

Pierre LAMBERT

La sédimentation dans le Lac de Neuchâtel (Suisse): processus actuels et reconstitution paléoenvironnementale de 1500BP à nos jours

Thèse soutenue le 20 Février 1997 devant le Jury d'Examen:

*Professeur Bernard Kübler, Université de Neuchâtel, président
Prof. Olivier Besson, Université de Neuchâtel,
Prof. Janusz Dominik, Institut F.-A. Forel,
Dr. Guy Lister, ETH-Zürich,
Dr. Michel Magny, Université de Franche-Comté,
Dr. François Nyffeler, Université de Neuchâtel.*



Institut de Géologie

1999

IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

**La sédimentation dans le lac de Neuchâtel :
processus actuels et reconstitution
paléoenvironnementale de 1500 BP à nos jours**

de M. Pierre Lambert

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL
FACULTÉ DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de
Neuchâtel sur le rapport des membres du jury,

MM. B. Kübler (directeur de thèse),
O. Besson, F. Nyffeler, J. Dominik (Genève),
G. Lister (ETH-Zürich) et M. Magny (Besançon)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 25 juin 1997

Le doyen:

R. Dändliker

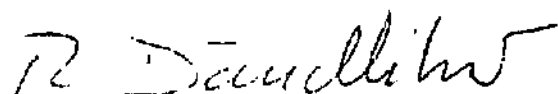


Table des matières

Résumé.....	1
Abstract.....	2
Remerciements.....	4

Chapitre 1 Introduction

1.1. Cadre et buts de la recherche.....	5
1.2. Généralités sur le Lac de Neuchâtel et son bassin d'alimentation.....	6
Figures.....	10

Chapitre 2 Méthodologie

2.1. Méthodes d'analyses physiques et chimiques de l'eau.....	13
2.2. Méthodes d'analyses physiques et chimiques des sédiments et des particules en suspension.....	14
2.2.1. Méthodes d'analyses physiques	14
2.2.2. Diffraction des rayons X	15
2.2.3. Méthodes d'analyse géochimique des sédiments	16
2.2.4. Détermination du taux de sédimentation.....	16
2.2.5. Analyse des isotopes stables du carbone et de l'oxygène.....	17
2.2.6. Paléolimnologie.....	18

Chapitre 3 Physico-chimie, turbidimétrie et paramètres biologiques des eaux du lac de Neuchâtel (juin 92-décembre 94)

3.1. Introduction.....	19
3.2. Thermique.....	19
3.3. Evolution temporelle et variabilité spatiale de la production phytoplanctonique.....	20
3.4. Teneur en oxygène dissous.....	23
3.5. pH.....	23
3.6. Conductivité électrique.....	23
3.7. Chimie de l'eau.....	24
3.8. Turbidimétrie.....	24
3.8.1. Individualisation des couches néphéloïdes.....	24
3.8.2. Relations entre les mesures de la turbidité et la charge totale de matière en suspension.....	25
3.8.3. Variabilité spatio-temporelle de la turbidité	26
3.9. Conclusions.....	27
Figures.....	28

Chapitre 4 Etude de la sédimentation actuelle

4.1. Introduction.....	51
4.2. Etude de la matière particulaire des principaux affluents du lac de Neuchâtel.....	51
4.2.1. Débits solides.....	51
4.2.2. Minéralogie de la matière particulaire des affluents.....	52
4.2.3. Géochimie de la matière particulaire des affluents	52
4.3. Etude de la matière en suspension dans le lac.....	53
4.3.1. Granulométrie.....	53
4.3.2. Minéralogie des particules en suspension dans le lac	53
4.4. Expérimentation par pièges à sédiments	53
4.4.1. Méthodologie: type de pièges adopté.....	53
4.4.2. Evolution des flux sédimentaires.....	54
4.4.3. Granulométrie du matériel récolté.....	55
4.4.4. Texture du matériel récolté.....	55

4.4.5. Estimation de la vitesse de sédimentation globale de la moyenne des particules.....	55
4.4.6. Minéralogie du matériel récolté.....	58
4.4.7. Géochimie du matériel récolté.....	58
4.4.8. Etude de la précipitation de la calcite.....	59
4.4.9. Etude de la remise en suspension de sédiment.....	61
4.4.9.1. Introduction.....	61
4.4.9.2. Relation entre les flux sédimentaires et l'intensité des vents.....	63
4.4.9.3. Evolution de la composition du matériel récolté et influence de la resuspension.....	64
4.4.9.4. La resuspension et le transport des particules étudiés par turbidimétrie.....	64
4.4.9.5. Bilan de la sédimentation.....	67
4.4.9.6. Tentative de quantification de la resuspension.....	68
4.4.9.7. Importance de la resuspension dans le recyclage des sels nutritifs.....	73
4.4.9.8. Discussion générale.....	74
4.4.9.9. Comparaison avec d'autres lacs.....	77
4.4.9.10. Comparaison des taux de sédimentation estimés par pièges avec ceux déduits de l'analyse des sédiments récents.....	78
4.4.9.11. Implications générales de la resuspension dans le lac de Neuchâtel.....	79
4.4.10. Etude de la sédimentation des pollens.....	79
4.4.10.1. Rapports entre période de pollinisation et récolte dans les pièges.....	79
4.4.10.2. Comparaison entre les différentes stations.....	80
4.4.10.3. Influence de la resuspension sur la sédimentation des pollens.....	81
4.4.10.4. Discussion et conclusions.....	81
4.4.11. Etude des isotopes stables (C et O) des carbonates récoltés par pièges à sédiments.....	82
4.5. Conclusions.....	83
Figures.....	85

Chapitre 5

Reconstitution de l'évolution des conditions environnementales de 1500BP à nos jours

5.1. Introduction.....	129
5.2. Description lithologique.....	129
5.3. Corrélations entre les différentes carottes courtes.....	129
5.4. Chronostratigraphie.....	130
5.5. Texture, taille de la calcite endogénique.....	130
5.6. Granulométrie.....	131
5.7. Minéralogie.....	131
5.8. Géochimie des éléments majeurs.....	132
5.9. Variation spatiale de la composition du sédiment de surface.....	132
5.10. Reconstitution du taux d'accumulation récente et datation des apports de tôle.....	132
5.10.1. Variation spatiale du taux d'accumulation récente.....	134
5.11. Dispersion des apports de tôle.....	135
5.12. Reconstitution paléoenvironnementale.....	136
5.12.1. Introduction.....	136
5.12.2. Analyses polliniques.....	136
5.12.3. Assemblages fossiles d'ostracodes.....	140
5.12.4. Etude des diatomées de la carotte C19c.....	140
5.12.5. Isotopes stables du carbone et de l'oxygène.....	140
5.12.6. Discussion générale.....	141
5.13. Conclusions.....	149
Figures.....	151

Chapitre 6: Conclusions générales

.....	178
-------	-----

Références bibliographiques.....	180
----------------------------------	-----

Annexes	191
----------------------	-----

Résumé

Le lac de Neuchâtel, situé dans la partie occidentale de la Suisse, constitue l'un des grands lacs péri-alpins d'origine abrasive glaciaire.

L'étude de la sédimentation moderne du lac s'est déroulée entre juin 1992 et mars 1995 à partir de trois stations de pièges à sédiments et de multiples campagnes de suivi des caractéristiques physico-chimiques de la colonne d'eau. Cette étude est centrée sur la dynamique du transport des particules et de la remise en suspension de sédiment en fonction des conditions météorologiques, hydrodynamiques et de stratification thermique.

La période estivale stratifiée est caractérisée par la précipitation de calcite endogénique, activée en présence d'une production phytoplanctonique ainsi que d'une température épilimnique élevée.

De manière générale, les flux sédimentaires suivent une forte périodicité saisonnière, les flux maximaux étant enregistrés durant la période non stratifiée. La remise en suspension de sédiment, dominante durant la période hivernale, se marque notamment par des flux sédimentaires élevés lors d'événements météorologiques perturbés. D'autre part, la signature isotopique très négative ("estivale") de la calcite récoltée dans les pièges à sédiments en hiver démontre son origine resuspensive. Une tentative de quantification a permis d'estimer que, selon la station considérée, entre 23 et 48% du matériel récolté au printemps et en été et entre 71 et 92% du matériel récolté en automne et en hiver provenaient de la remise en suspension de sédiment.

Un schéma global reliant la sédimentation au fonctionnement hydrodynamique du lac est proposé. Le mélange complet hivernal constitue le facteur dominant dans la redistribution des particules. L'état de la stratification thermique s'avère en effet déterminant quant à la localisation et à l'intensité de la resuspension; au fur et à mesure que le contraste de température entre épi- et hypolimnion diminue, la zone sujette à la remise en suspension s'étend du plateau lacustre et des tombants aux zones profondes du bassin. L'action des courants au niveau de la thermocline constitue également un important mécanisme de redistribution du sédiment; les flux sédimentaires maximaux sont en effet observés en automne sur les tombants, particularité probablement attribuable à l'action des ondes internes à l'interface entre épi- et hypolimnion.

Un calcul de bilan de la sédimentation démontre que le transfert latéral de matériel en provenance de remises en suspension dans les zones périphériques peu profondes du lac ne constitue pas le type de transport prépondérant en période non stratifiée. Il est au contraire suggéré que les courants de fond remettent en suspension le sédiment et qu'un transport aussi bien vertical qu'horizontal a lieu durant l'hiver, probablement sous l'effet d'un mécanisme de convection à large échelle. Durant la période stratifiée, par contre, les particules remises en suspension sont transportées latéralement vers le large à partir du plateau lacustre et de la partie supérieure des tombants.

Les coefficients de diffusion turbulente verticale sont estimés d'après les profils des flux sédimentaires resuspensifs. En ce qui concerne la station située en zone profonde, leur estimation évolue de $2.2 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ en été à $10.5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ en automne et à $70.9 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ en hiver, pour rediminuer à $14.1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ au printemps. Les valeurs hivernales traduisent un important mélange convectif et témoignent de la facilité avec laquelle les particules sont distribuées à travers la colonne d'eau durant la période non stratifiée, menant à un mélange intermittent (saisonnier) quasi complet du matériel particulaire.

L'existence d'un régime préférentiel de circulation est postulée à partir de la répartition différentielle des particules dans les bassins nord-ouest et sud-est du lac. Il se manifeste par un courant de downwelling le long du tombant sud-est et d'upwelling le long du tombant nord-ouest. Ce régime hydrodynamique serait dû à la prépondérance des vents en provenance du sud-ouest.

La remise en suspension du sédiment provoque un recyclage des sels nutritifs. D'après un calcul de bilan simple, la quantité de phosphore particulaire remis annuellement en suspension équivaut environ aux 2/3 des apports totaux de phosphore au lac.

Le mécanisme de remise en suspension dans le lac de Neuchâtel paraît donc être un phénomène d'importance majeure, produisant un couplage intime entre le sédiment de surface et la colonne d'eau.

La reconstitution de l'évolution des conditions environnementales durant la période tardi-Holocène constitue la seconde partie de ce mémoire. Elle a été réalisée à l'aide de l'analyse de plusieurs colonnes sédimentaires. La palynologie, la chronostratigraphie (datations ^{14}C -AMS), les analyses minéralogiques et géochimiques du sédiment, l'étude des assemblages fossiles d'ostracodes et de diatomées ont permis de reconstituer l'impact anthropique sur l'environnement lacustre ainsi qu'au niveau du bassin versant du lac.

L'analyse pollinique détaillée du sédiment laisse apparaître deux phases majeures de déforestation, la première à la fin du Haut Moyen Âge, vers ca.600-700AD et la seconde durant le Moyen Âge vers ca.1200-1500AD. Les modifications de la composition du sédiment, les changements observés au niveau des assemblages d'ostracodes et de diatomées indiquent que ces défrichements ont provoqué une érosion accrue des sols de même qu'une perturbation de l'écosystème lacustre par une augmentation des apports de sels nutritifs au lac. La reconstitution des taux d'accumulation depuis le Subboréal confirme que le contrôle sur les apports détritiques est exercé pour la période tardi-Holocène par l'intensité de l'impact de l'homme sur la végétation. L'accélération récente de

l'eutrophisation du lac se marque par une augmentation des taux d'accumulation et notamment de celui du carbone organique ainsi que par l'apparition de nouveaux taxons de diatomées indicateurs de milieux eutrophes.

Les analyses des isotopes stables de l'oxygène sur les carapaces calcitiques des ostracodes et sur les carbonates totaux laissent apparaître une modification de la composition globale de l'eau du lac entre ca. 1300-1500AD. Une diminution de 1° à 1.5°C de la température moyenne de l'air est proposée pour cette période qui correspond à la transition entre l'Optimum Climatique Médiéval et le Petit Age Glaciaire.

La tendance vers des valeurs plus négatives des rapports $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates totaux en correspondance avec l'augmentation récente de l'eutrophisation et avec l'apparition de calcites de plus grande taille est reliée à une précipitation en déséquilibre de la calcite endogénique. L'analyse du matériel des pièges à sédiments a en effet permis de conclure qu'une précipitation en déséquilibre peut avoir lieu, probablement en relation avec une vitesse de cristallisation rapide activée lors de périodes de forte productivité.

Abstract

Lake Neuchâtel is located in the Western part of Switzerland. It is one of the large peri-alpine lakes, formed by the abrasive action of glaciers. This basin, which reaches a maximal depth of 153m, experiences complete mixing annually.

The study of modern sedimentation has been performed from June 1992 through March 1995. Through the deployment of three sediment trap moorings and through the sampling and regular monitoring of the physico-chemical parameters of the water column, the particle transport processes were characterized. Focus was given on the forcing mechanisms of sediment resuspension, with particular attention to the meteorological, hydrodynamic and thermal stratification conditions.

The summer stratified period is characterized by endogenic calcite precipitation, which appears to be promoted by high levels of phytoplanktonic productivity and by the raising of epilimnetic temperature.

Mass flux data indicate strong seasonal patterns, with maximum fluxes recorded during the unstratified period. Sediment resuspension is indicated by high sediment fluxes during disturbed atmospheric events. In winter, the presence in high proportions of endogenic calcite with a negative ("summer") isotopic signature is a further evidence of the dominant influence of resuspension during the unstratified period. A quantitative evaluation of the net and resuspensive fluxes led to the following results: according to the station considered, sediment resuspension accounted for between 23 and 48% of the total near bottom sedimentation rates in spring and summer and for between 71 and 92% in autumn and winter.

A global model relying sedimentation to the hydrodynamic functioning of the lake is proposed. Complete mixing appears to be the dominant factor in sediment redistribution. State of thermal stratification determines the location and intensity of resuspension; deepward extension of the area subject to resuspension actually increases concurrently to the decrease in thermal density gradient. The action of strong currents in the thermocline impingement region constitutes another important factor in sediment resuspension; maximum mass fluxes are recorded in autumn on the slopes, suggesting an influence of the oscillatory motion of internal waves at the interface between epi- and hypolimnetic waters.

Mass balance calculation of sedimentation demonstrates that the lakeward lateral transport of material resuspended in the shelf areas is not the dominant mechanism during the unstratified period. We suggest that bottom currents put the material in suspension, which is then transported vertically from the bottom as well as horizontally from the peripheral slope and shelf. Large scale convection is considered as the mechanism responsible for this distinctive feature. In contrast, during the stratified period, resuspended particles are transferred lakeward laterally from the shelf and the upper part of the slope.

Profiles of resuspended mass fluxes allow the evaluation of the coefficient of vertical turbulent diffusion. The values increase from 2.2 cm^2s^{-1} in summer to 10.5 cm^2s^{-1} in autumn and 70.9 cm^2s^{-1} in winter. The mean spring value is 14.1 cm^2s^{-1} . Winter values are indicative of an important convective mixing and point out how easily the particles are dispersed throughout the water column, leading to an intermittent almost complete mixing of the particulate material.

The different suspended material repartition in the NW and SE lake sub-basins testify the existence of a preferential hydrodynamic circulation pattern. The general scheme consists in downwelling currents along the SE slope and upwelling currents along the NW slope. We suggest that predominant west winds account for this feature.

The role of sediment resuspension in the cycling of phosphorus is examined. The reconstruction of phosphorus budget shows that resuspended mass fluxes of particulate phosphorus amount about 2/3 of the total phosphorus influxes to the lake.

Mechanism of resuspension appears to be an important feature of lake Neuchâtel sedimentation, leading to an intimate coupling between superficial sediments and the water column.

Reconstruction of the environmental conditions during the late-Holocene period is the subject of the second part of this dissertation. Several short cores have been studied for this purpose. Palynology, chronostratigraphy (^{14}C -AMS datings), mineralogical and geochemical analyses, fossil ostracode and diatom assemblages allow to reconstruct the human influence on the lacustrine environment as well as on its catchment basin.

Detailed pollen analysis let appear two major phases of forest clearings. The first one took place toward the end of the High Middle Ages (ca.600-700AD) and the second one during the Middle Ages, at about 1200-1500AD. Modifications of sediment composition, changes in fossil ostracode and diatom assemblages correspond to the model: deforestation $\rightarrow$ increased soil erosion $\rightarrow$ increased nutrient influx to the lake. The reconstruction of accumulation rates since the Subboreal period confirm that the intensity of human impact on vegetation has controlled the detrital influxes to the lake during the late-Holocene period. Recent acceleration of eutrophication is testified by increased organic carbon accumulation rates as well as by the appearance of several indicators of eutrophy among diatoms.

Paleoclimatic information is mainly provided by the oxygen isotopic records of ostracode shells and bulk carbonates. A global modification of the isotopic composition of lake water can be inferred for the Middle Ages, at about 1300-1500AD. It suggests a drop of 1° to 1.5°C in mean annual air temperature at the transition between Medieval Warm Period and Little Ice Age.

A trend toward more negative bulk carbonates $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values appears in parallel with the recent acceleration of eutrophication and with the apparition of larger calcite crystals. Disequilibrium calcite precipitation is proposed to explain this feature. Analysis of sediment trap material supports this conclusion and suggests that disequilibrium precipitation is related to high crystallization rates during periods of high phytoplanktonic productivity.

Remerciements

Tout d'abord il faut dire que si ce travail a pu être mené à terme c'est grâce à l'aide et au soutien de nombreuses personnes, collègues et amis. J'ai aujourd'hui le plaisir de les remercier:

En premier lieu j'aimerais exprimer toute ma gratitude à mes parents, qui m'ont soutenu durant toute la période de mes études.

J'aimerais également remercier mon épouse, Kathrin, d'avoir écrit les meilleurs paragraphes de ce travail et pour toutes les occasions où elle ne m'a pas détourné.

Je tiens tout particulièrement à exprimer ma reconnaissance et gratitude à mon directeur de thèse, le Prof. Bernard Kübler pour son soutien amical et ses conseils avisés. Son ouverture scientifique m'a permis d'établir de nombreux contacts avec des scientifiques d'autres universités suisses et étrangères.

Je remercie vivement le Prof. Olivier Besson, qui a su me faire profiter de son expérience lors de nos campagnes sur le lac et qui a été l'initiateur du projet dans lequel s'inscrit cette thèse.

J'ai également bénéficié de l'application des Drs. Michel Magny et François Nyffeler, tous deux membres du jury de thèse, quant à la correction du manuscrit.

Que toutes les personnes qui ont participé aux campagnes sur le lac soient remerciées; Florence Gendre et Laurent Marguet qui ont été mes partenaires au quotidien, Carlos Beck, Albin Collaud, et bien d'autres. Mes vifs remerciements vont à Laurent Marguet qui a géré de manière parfaite les programmes d'acquisition et de traitement des données de la sonde multiparamètre et qui a barré le Dorémi.

Je suis redevable au Prof. Janusz Dominik et à Jean-Luc Loizeau de m'avoir accueilli dans leur laboratoire d'analyses radioisotopiques de l'Institut Forel, et pour les fructueuses discussions scientifiques que j'ai pu avoir avec eux. J'adresse mes remerciements à tous les collaborateurs de Forel qui m'ont si gentiment accueillis, et notamment Elisabeth Graf Pannatier, Annette Hofmann, Philippe Arpagaus et Thomas Billen.

J'aimerais aussi témoigner ma reconnaissance au Dr. Guy Lister pour ses corrections minutieuses et constructives. Mes remerciements vont aux collaborateurs de l'ETH Zürich, à Frank Niessen, ainsi qu'à Stefano Bernasconi et Jane Terranes pour les analyses isotopiques. Je suis également redevable à Ulrich von Grafenstein qui a partagé son expérience des études isotopiques sur valves d'ostracodes.

J'adresse mes sincères remerciements à Pascale Ruffaldi et à Olivier Puertas pour les patientes analyses palynologiques qu'ils ont effectuées, à Jean-Claude Druart pour les analyses des diatomées du sédiment, à Walter Geiger pour l'identification des espèces d'ostracodes.

Ma collaboration avec le Dr. Mizzi Filippi était non seulement agréable, mais aussi très enrichissante; elle a trop rarement illuminé mon quotidien et celui des ostracodes volants. J'aimerais encore remercier Philippe Hadorn et Nigel Thew pour nos discussions enrichissantes ainsi que Ulrich von Grafenstein, Antje Schwalb et Essaid Zeroual, qui m'ont fait partager leurs connaissances des ostracodes et de l'analyse isotopique de leurs valves.

Enumérer ici tous mes collègues de l'Institut de géologie qui m'ont aidé au cours de ces longues années serait trop long. J'aimerais néanmoins remercier les trois minettes qui m'ont tolérées dans mon bureau: à Caro, la poseuse de lapins, qui a provoqué l'augmentation exponentielle de mes primes d'assurance maladie, à Marie, qui ne s'intéresse hélas qu'à Brad Pitt et à Anna qui a toujours su me tenir au courant. Les conseils du Dr. Thierry Audebert m'ont aussi toujours été d'une grande utilité. Marc ne s'est jamais lassé de mon analphabétisme informatique, Essaid m'a beaucoup aidé par ses conseils avisés.

En dernier lieu, soient également remerciés tous mes amis qui n'ont pas directement participé à l'élaboration scientifique de cette thèse et que j'ai dû ennuyer plus d'une fois et qui néanmoins ne se sont jamais lassés de s'intéresser à la fin de ce travail.

Enfin, mon principal sponsor, le Fonds National Suisse de la recherche Scientifique, a assuré le financement de ces nombreuses années de recherche (crédits no. 20-31162.91 et 20-37498.93).

CHAPITRE 1

Introduction

1.1. Cadre et buts de la recherche

Cette recherche s'inscrit dans le contexte des études dirigées depuis une quinzaine d'années par le Professeur Bernard Kübler et centrées sur les processus sédimentologiques et biogéochimiques du Lac de Neuchâtel (Kübler et al. 1979; Bapst 1987; Bapst & Kübler 1987; Beck 1987; Pittet 1990; Pittet et al. 1990) ainsi que sur les sédiments de ce lac en tant qu'archives pour la reconstitution des climats passés (Schwaib 1992; Schwaib et al. 1994; Rolli, thèse en cours).

Le but initial de ce travail, qui fait partie d'une étude pluridisciplinaire intitulée "Hydrodynamique et biogéochimie du Lac de Neuchâtel", était de vérifier la signature tant au niveau de la qualité du sédiment de surface qu'à celui de la matière particulaire en suspension (MES) de l'existence de régimes de circulation hydrodynamique particuliers, restreints aux bassins topographiques du lac.

Formulée par Bapst (1987) sur la base de répartitions spatiales particulières du talc et de la kaolinite dans la matière en suspension, cette hypothèse a trouvé un appui au niveau de la modélisation numérique de la circulation hydrodynamique; lors de certains événements météorologiques, les modèles numériques prévoient la mise en place de cellules hydrodynamiques restreintes aux bassins topographiques du lac (Zuur & Dietrich 1990; Besson & Zuur 1992).

Cette hypothèse a été progressivement abandonnée, la variabilité spatiale de la qualité du sédiment et de la matière en suspension s'étant avérée faible. D'autres thèmes de recherche ont ensuite été adoptés et se sont articulés d'une part sur la dynamique de la sédimentation actuelle et d'autre part sur l'histoire de la sédimentation tardi-Holocène à récente.

La sédimentation est un des processus fondamentaux qui gouvernent le métabolisme d'un lac. Elle influence la régénération des nutriments épilimniques, transporte la matière particulaire vers le fond et contrôle l'apport de nourriture aux organismes benthiques. Les particules peuvent affecter la chimie de l'eau par la précipitation, la dissolution (Lal & Lerman 1973; Lerman et al. 1974), l'adsorption et la désorption (Karickhoff et al. 1979), l'enfouissement et la resuspension (Edgington & Robbins 1976; Chambers & Eadie 1981). La distribution, la concentration et la composition de la matière particulaire en suspension (MES) sont gouvernées par de multiples processus: production chimique et biologique, vitesse de sédimentation, resuspension, apports des affluents et de l'atmosphère, érosion des rives, hydrodynamisme, etc.

La mesure des flux sédimentaires par pièges à sédiments est une des méthodes qui permet d'étudier la sédimentation du matériel particulaire. Elle offre la possibilité d'établir des bilans de matière, d'estimer le taux de sédimentation, etc. Des pièges correctement dimensionnés collectent les particules en cours de sédimentation avec une efficacité égale ou supérieure à 90% (Hargrave & Burns 1979; Bloesch & Burns 1980; Gardner 1980).

La sédimentation du seston est en outre d'un intérêt pratique en tant que paramètre - flux, vitesse de chute, resuspension - à intégrer dans les modèles utilisés à l'appui des programmes qui visent au rétablissement de l'état d'un lac.

La compréhension des processus de la sédimentation actuelle revêt une importance fondamentale dans la reconstitution de l'histoire de la sédimentation passée. Différents paramètres peuvent être calibrés dans les limites de l'évolution des conditions actuelles du milieu et cette calibration peut être ensuite utilisée afin de reconstituer les environnements passés.

L'étude de la dynamique des resuspensions trouve son intérêt dans la mesure où les processus de resuspension du sédiment influencent le recyclage des composés ayant une grande affinité pour la matière particulaire. D'une part, la réinjection de matière particulaire dans la colonne d'eau à partir du sédiment entraîne l'adsorption de contaminants ayant une forte affinité pour la matière particulaire mais d'autre part expose à nouveau la masse d'eau considérée aux contaminants contenus dans cette même matière particulaire.

Si l'importance de ce phénomène est reconnue et sa réalité physique enregistrée dans de nombreux lacs (Eadie et al. 1990; Evans 1993), les facteurs déterminants de ce processus ne sont pas toujours clairement établis.

L'étude de la sédimentation actuelle a donc été entreprise en vue de mieux appréhender la dynamique sédimentaire présente et passée du lac de Neuchâtel. Il s'est agi - principalement à l'aide d'une expérimentation par pièges à sédiments - de quantifier et de déterminer l'origine des flux sédimentaires, de tenter d'estimer les taux d'accumulation totale, les vitesses de chute et les modes de transport des particules, d'appréhender la dynamique saisonnière de la sédimentation, la dynamique des resuspensions ainsi que de tenter de quantifier ces resuspensions.

La compréhension des mécanismes de transport et de dispersion de la matière en suspension (MES) est d'un intérêt primordial dans le contexte de la prédiction de la dispersion de pollutions discrètes ou de long terme (emplacement d'une station d'épuration et de ses effluents par exemple) ainsi que pour la gestion de l'environnement lacustre en général.

La dispersion des particules en suspension a été étudiée par l'intermédiaire d'un traceur artificiel d'origine industrielle, le talc. Cette étude a eu notamment pour but de tester l'hypothèse de l'existence de régimes de

circulation hydrodynamique particuliers, restreints aux bassins topographiques du lac, et ceci en vérifiant l'existence de sites privilégiés de sédimentation.

L'étude de la sédimentation tardi-Holocène a eu pour but de reconstituer les modifications qu'a subi l'écosystème lacustre en relation avec l'évolution du bassin versant, ainsi que d'appréhender les causes de ces modifications, qu'elles soient anthropogéniques, climatiques ou autres. La reconstitution des environnements et des climats passés, outre son intérêt historique, peut nous donner des informations sur les fourchettes de variabilité des processus, qu'ils soient naturels ou provoqués par l'homme, ainsi que des informations sur les causes des phénomènes observés.

Les modifications du milieu dues à l'action de l'homme sont souvent difficilement reconnaissables par rapport aux variations naturelles en ce qui concerne la période tardi-Holocène. Notre étude, qui vise notamment à séparer leur influence respective, s'inscrit dans le contexte d'une emprise croissante de l'homme sur son environnement.

Différentes analyses ont été entreprises:

- analyse pollinique des sédiments qui permet de reconstituer l'état de la couverture végétale;
- analyse des assemblages d'ostracodes et de diatomées afin d'obtenir des informations sur le niveau trophique des eaux du lac;
- analyse de la composition générale du matériel et reconstitution des taux d'accumulation afin de suivre l'évolution de la précipitation carbonatée, de l'érosion des sols et de la paléoproduktivité;
- analyse des isotopes stables de l'oxygène des carbonates totaux et des valves d'ostracodes, susceptibles notamment de nous donner des indications sur l'évolution paléohydrologique du lac, sur l'évolution passée de la température de l'air, sur la paléoproduktivité.

L'étude des variations spatio-temporelles des variables physico-chimiques de l'eau et du développement du phytoplancton, partie du projet "Hydrodynamique et biogéochimie du Lac de Neuchâtel" a été réalisée principalement par Florence Gendre, lors d'une recherche post-doctorale (lire à ce sujet Kübler (1996)). Le Professeur Olivier Besson, chef du projet susmentionné de 1991 à 1993, a également pris une part active à cette étude. Un aperçu des résultats principaux sera présenté au chapitre 2.

1.2. Généralités sur le Lac de Neuchâtel et son bassin d'alimentation

Morphométrie, morphologie, origine

Le lac de Neuchâtel est situé sur la bordure septentrionale du bassin molassique suisse, au pied de la Haute Chaîne du Jura (Figs.1.1. et 1.2.). Il s'agit d'un lac monomictique chaud. Ses caractéristiques morphométriques principales sont présentées au Tableau 1.1. Une description plus complète figure dans la thèse de Sollberger (1974).

Altitude moyenne	429.3m
Superficie	217.9km ²
Longueur	38.3km
Largeur maximale	8.1km
Largeur moyenne	5.68km
Profondeur maximale	153m
Profondeur moyenne	64.2m
Volume	13.8km ³
Temps de résidence moyen de l'eau	8.25ans

Tab.1.1. Caractéristiques morphométriques principales du lac de Neuchâtel

Le Lac de Neuchâtel possède une forme plus ou moins rectangulaire. Sa principale particularité bathymétrique est constituée par la présence d'une colline sous-lacustre culminant à 8-9m de la surface et connue sous le nom de "La Motte". Cette colline individualise de manière imparfaite trois bassins (Fig.1.2.):

- bassin NW: côté rive gauche, d'Onnens à l'embouchure de l'Areuse, d'une profondeur maximale de 153m et toujours supérieure à 100m.
- bassin SE: côté rive droite, d'Estavayer-le-Lac à Portalban, bien individualisé à l'Est de Forel, de profondeur variant entre 50m au large d'Estavayer et 120m au large de Portalban.
- bassin de Neuchâtel: sépare la Motte des rives nord et est; sa profondeur avoisine 130m.

Le Haut-lac constitue la partie la plus étroite du lac entre Yverdon et la ligne Yvonand-Onnens. Le Bas-lac correspond au plateau lacustre situé à l'Est de la ligne Cudrefin-Monruz.

L'origine du Lac de Neuchâtel a été discutée dès le milieu du XIX^e siècle. Les premières hypothèses émises parlaient d'érosion fluviale ou de mouvements tectoniques (Sollberger 1974). L'explication actuellement largement acceptée est celle d'une cuvette de surcreusement glaciaire. Des bassins surcreusés d'une profondeur pouvant atteindre 400m sont présents sous le Seeland (Pugin 1991). La base de l'un d'eux avoisine le niveau de la

mer près de Neuchâtel puis remonte en direction du NE, ce qui selon cet auteur exclut ainsi une origine fluviale du lac.

Une partie des informations suivantes est tirée de Schwalb (1992). Lors de la dernière période glaciaire du Würm, le glacier du Rhône a atteint son extension maximale à Wangen an der Aare (Jäckli 1972; Pugin 1991) et un glacier local centré approximativement sur la région vallée de Joux - Mouthe - Morez - St.Claude - crêtes du Jura recouvrait une partie de la chaîne (Campy 1982; Campy & Arn 1991). Le retrait du glacier du Rhône de la région de Neuchâtel est estimé à 15'000 ans BP (Gaillard & Moulin 1989). Pour Schlüchter (1988), la déglaciation a été simultanée dans les Alpes et dans l'avant-pays vers 14'000 ans BP et Pugin (1991) suppose une fonte rapide des glaciers alpins. L'hypothèse de la formation d'un grand lac "de Soleure" après le retrait du glacier du Rhône qui se serait étendu de la plaine de l'Orbe à Soleure à une altitude d'environ 450m (Schardt 1898; Lüdi 1935; Schwab & Müller 1973; Portmann 1974) est aujourd'hui très controversée. D'une part les analyses palynologiques et sédimentologiques de Cortaillod-Les Pendantes (Brochier 1986; Hadorn 1986) indiquent plutôt que ces sédiments ont été déposés lors d'une période interglaciaire antérieure (Moulin 1991), d'autre part l'habitat magdalénien d'Hauterive-Champréveyres (>12'600BP) à une altitude de 425-426m et l'absence d'indications d'un haut niveau du lac avant cette période tend à réfuter cette hypothèse (Egloff 1989; Gaillard & Moulin 1989; Moulin 1991). L'Aar s'est jetée dans le Lac de Neuchâtel jusqu'à approximativement 4800BP, excepté au Préboréal et lors de deux courtes périodes situées entre 7200 et 6950 BP (Schwalb 1992). L'ancien réseau des méandres de l'Aar entre Aarberg et le Lac de Neuchâtel a également été reconnu (Ammann et al. 1990; Wohlfarth & Ammann 1991). Enfin, le niveau des eaux du lac a été abaissé artificiellement d'environ 2.7m lors de la première correction des eaux du Jura en 1868-91. Son niveau est contrôlé par les écluses de Port près Nidau, au sortir du lac de Bienne.

Bassin d'alimentation: climat, géologie, sols, végétation

Le bassin d'alimentation du Lac de Neuchâtel occupe une superficie de 2672km², se répartissant à peu près également entre le Plateau molassique suisse et la chaîne du Jura (Fig.1.1.). Ce chiffre se réduit à 1682km² si l'on excepte les bassins d'alimentation des lacs de Morat, des Tailières, Brenet et Loclat. Son altitude moyenne avoisine 780m, 26.7% de sa surface est située au-dessus de 1000m, le point le plus élevé étant le Mont Tendre (1680m).

Les principaux affluents du lac de Neuchâtel sont présentés au Tableau 1.2. La Broye, l'Areuse et la Thielle (ou Orbe) totalisent plus de 50% des apports liquides du lac.

L'émissaire, le canal de la Thielle dont le cours est parfois inversé, débite en moyenne 59.5m³/s (période 1979-90; source: Annuaire hydrologique de la Suisse, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, OFEFP).

	débit annuel moyen [m ³ s ⁻¹]	période de suivi des mesures	superficie du bassin versant [km ²]
La Broye	13.1	1979-90	697
L'Areuse	12	1983-90	377
La Thielle	11.9	1973-90	333
La Serrière	2.31	1982-88	?
L'Arnon	2.22	1985-89	90
La Mentue	1.58	1971-90	105
Le Seyon	0.93	1980-90	112

Tab.1.2. Débits moyens et superficie du bassin versant de sept des principaux affluents du lac de Neuchâtel

La partie jurassienne du bassin versant est principalement constituée de calcaires et marnes jurassiques et crétacées. Elle est marquée par une hydrologie karstique caractéristique. Les vallées et les coteaux jurassiens sont en partie recouverts de moraines et d'alluvions quaternaires ainsi que de molasse tertiaire. Le plateau suisse est dans cette région constitué de grès, marnes et conglomérats de la Molasse d'Eau Douce Inférieure d'âge aquitainien et de la Molasse Marine Supérieure d'âge burdigalien ainsi que de dépôts morainiques quaternaires (Fig.1.1.).

Le climat à Neuchâtel est tempéré, typique de l'Europe centrale, avec une diminution de la composante océanique en direction de l'est. La température moyenne annuelle de l'air à Neuchâtel s'établit à 9.2°C pour la période 1901-1980, les extrêmes mensuels étant 0.0°C en janvier et 18.6°C en juillet (Fig.1.3.). Un récent réchauffement est perceptible; les valeurs de température moyenne de l'air à Neuchâtel pour les périodes 1940-1995 et 1984-1995 sont en effet de respectivement 9.6° et 10.0°C. Les précipitations totalisent 976mm en moyenne à Neuchâtel sur la même période (Fig.1.3.). La station de Chaumont (1132m) permet d'avoir une idée de l'évolution climatique avec l'altitude (Fig.1.3.). La température moyenne de l'air y a atteint 6.8°C en 1992 (Neuchâtel: 10.3°C), alors que les précipitations ont totalisé 1343mm (Neuchâtel: 1060mm). Les vents dominants sont parallèles à la direction générale SW-NE du lac (Fig.1.4.); ce sont "Le Vent", de direction W-SW

Chapitre 1: Introduction

(42% en 1992) et "La Bise" de direction E-NE (35% en 1992). Mentionnons encore "Le Joran", vent thermique, de direction N-NW (13% en 1992) (Jornod 1993). On remarquera à la Figure 1.4., qui présente la rose des vents à Neuchâtel pour la période 1978-1990, que la fréquence des vents faibles (inférieurs à 2m/s) en provenance du nord-est est supérieure à celle des vents faibles de provenance ouest à sud ouest. Le contraire est valable pour les vents de plus forte intensité.

La végétation actuelle est décrite par les cartes de végétation de Richard (1965). Le rivage nord du lac est aujourd'hui partiellement construit, alors que le rivage sud est occupé par une cariçaie (réserve de la Grande Cariçaie). Etant donné les variations d'altitude prononcées, la région renferme une riche mosaïque de végétation. Le pied du Jura, lorsqu'il n'est pas construit est principalement occupé par des vignes et des surfaces agricoles. Les forêts riveraines ont en grande partie disparu, mais la première correction des eaux du Jura a permis la création de nouvelles zones (abaissement du niveau du lac de 2,75m entre 1875 et 1880). Ce sont des forêts apparentées à l'aulnaie marécageuse, à la frênaie au merisier à grappes ou à la frênaie à orme (Hadorn 1994). Jusqu'à 600m environ s'étendent sur les calcaires les chênaies pubescentes, où se développent de nombreuses espèces subméditerranéennes: chêne pubescent, buis, érable à feuilles d'obier, géranium sanguin, coronille en couronne, etc. (Hadorn 1994). La chênaie à gesse noire apparaît parfois dans la chênaie buissonnante, sur les surfaces morainiques. Sur les pentes raides, des prairies sèches peuvent remplacer la forêt, avec des essences telles que brème dressé, ail à tête ronde, arabelle tourette, prunier mahaleb, orchidées, etc. (Hadorn 1994). De 600 à 900m environ, se développe la hêtraie à laiches blanches, sur calcaires, qui peut être remplacée par une hêtraie à luzule sur surfaces morainiques ou par une hêtraie typique ou hêtraie à cardamine. Les hêtraies à sapin blanc apparaissent dès 800-900m.

Les sols typiques du Jura sont des brunisols développés sur les Löss (Pochon 1973), les moraines et sur les calcaires impurs et/ou tendres. Des rendosols peuvent également être développés sur les calcaires mais ne sont la plupart du temps que des stades transitoires vers les brunisols. Des sols humo-calcaires sont développés sur les calcaires purs et durs.

Le plateau molassique est également dominé par des brunisols ou brunisols dégradés (luvisols néoluviques) développés sur les moraines würmiennes. Les hêtraies dominent là où elles n'ont pas été remplacées par des cultures, ou par la favorisation, depuis le siècle passé, de l'épicéa. Des sols calcimagnésiens se développent principalement sur la molasse.

Le Seeland est dominé par des cultures maraîchères sur des histosols principalement.

Histoire du peuplement

La reconstitution de l'histoire du peuplement est susceptible de nous fournir des indications sur l'évolution des activités humaines. Leur influence sur l'environnement du bassin versant et indirectement sur l'écosystème lacustre (modifications de la végétation, érosion des sols, etc.) seront ainsi mieux appréciées.

En pays neuchâtelois, la documentation archéologique débute au Paléolithique moyen, à env. 40'000BP (homme de Néanderthal) avec deux sites en grottes (Cotencher, à Rochefort, et Les Plaints, à Couvet). Suit un vide d'environ 30'000 ans jusqu'aux trois sites connus du Paléolithique supérieur, Magdalénien (>12'600BP) et Azilien (12'300BP): Champréveyres, grotte du Biehon (découverte d'un squelette de Cro-Magnon) et la Baume des Brennetets. Le Mésolithique est représenté par l'abri du Col des Roches au Locle (7-8'000BP). La fondation de villages des Palaffites est attestée dès le 39^e siècle avant J.-C. Le Jura ne semble pas avoir été épargné par les influences néolithiques dès le début du V^e millénaire avant J.-C., notamment aux lacs de Chalain (Richard 1994) et de Clairvaux (Pétrequin & Pétrequin 1988; Pétrequin 1989) ainsi qu'au Mollendruz (Vaud) à 1100m d'altitude (Crotti & Pignat 1986 in Richard, 1994). D'après Richard (1994), la néolithisation est totale vers 4'000ans avant J.-C. entre 700 et 1100m d'altitude dans le Jura.

Pour en revenir au Lac de Neuchâtel, l'histoire des "lacustres" se poursuivra à travers le Néolithique et l'âge du Bronze, durant trois millénaires. Le Néolithique débute avec la civilisation de Cortaillod où apparemment chaque baie fut habitée (une dizaine de sites entre St-Aubin et Préfargier; Egloff, 1989). L'occupation des rivages dura sans discontinuer jusqu'au 25^e siècle avec les phases de Horgen, Lüscherz et Auvernier. Depuis cette époque jusqu'aux premiers témoignages de l'âge du Bronze, 750 ans plus tard, aucun habitat du rivage n'a été mis à jour.

L'existence d'une vingtaine d'ensembles habités le long des rives est attestée, trois sites ayant été fouillés depuis 1970 (Auvernier-Nord, Cortaillod-Est et Hauterive-Champréveyres). Quelques outils retrouvés sur les flancs du Jura indiquent que le rivage n'était pas le seul lieu fréquenté (haches en Bronze de Malvilliers et du Creux-du-Van, céramiques de la Baume du Four). A l'âge du Bronze succèdent au 7^e siècle avant notre ère le premier puis le deuxième âge du Fer et donc la célèbre civilisation de la Tène. Excepté l'illustre localité, on connaît un pont à Cornaux et des tombes dans le Jura (Cressier, Coffrane, Valangin, Bevaix,...). L'époque gallo-romaine se signale par la présence de grands domaines agricoles (littoral et Val-de-Ruz), quelques tronçons de chaussée, un navire (barque de Bevaix), un mausolée (Wavre). Au début du Moyen Age, des nécropoles ont été découvertes en plusieurs points du littoral. Le peuplement des vallées médianes du Jura (jusqu'à 800m d'altitude environ) est attesté par la toponymie gallo-romaine ou burgonde des localités. Les Montagnes neuchâteloises ont commencé à véritablement se peupler au XII^e et XIII^e siècles (Scheurer 1989b; Scheurer 1989a). De nombreux défrichements sont attestés. Cette poussée démographique se traduit par l'apparition de localités situées au-dessus de 800m et dont le nom est précédé de l'article défini (Le Locle, La Sagne, etc.). Marqués d'un temps d'arrêt par

l'épidémie de peste de 1349/50, les défrichements reprirent dans des proportions jusqu'alors inégalées de la fin du XIV^e au milieu du XVI^e siècle environ.

Il semble donc que de profondes modifications de l'environnement sont intervenues au Moyen Age dans la région jurassienne du bassin d'alimentation du lac de Neuchâtel. Ces modifications sont-elles à même d'avoir sensiblement perturbé l'écosystème lacustre? Qu'elle que soit la réponse, les changements de composition du sédiment lacustre seront à considérer selon cette perspective dans un contexte climatique qui peut être caractérisé comme étant d'une relative stabilité.

Le climat de la période tardi-Holocène

L'optimum climatique de la période Holocène se situe durant l'Atlantique. En Europe, les limites altitudinales et latitudinales du chêne étaient maximales vers 6'000BP. L'aulne s'est fortement répandu entre 9'000 et 6'000BP. Les forêts de pin et de sapin s'étendaient pratiquement jusqu'à la mer Arctique vers 6'000BP. Les limites latitudinales de ces mêmes forêts ainsi que de l'aulne, du chêne, du bouleau ont repris une position plus méridionale depuis. Cela suggère une élévation générale de la température de la saison estivale en Europe du Nord et du Centre de 9'000 à 6'000BP, suivi d'un déclin des températures estivales (Huntley & Prentice 1993). Les conditions étaient probablement relativement humides vers 6'000BP. A noter que Lister (Lister 1988a) postule une température au Bölling de 1.5 à 2°C plus basse qu'actuellement et pas de refroidissement depuis l'optimum climatique mi-holocène.

Plusieurs phases de variations climatiques ont été reconnues dans nos régions pour la période 6'000BP à l'actuel. Ces reconstitutions sont basées d'une part sur la reconnaissance des périodes d'avance et de recul des glaciers dans les Alpes, notamment à l'aide de références dendrochronologiques établies à partir des bois fossiles trouvés dans les marges proglaciaires (Patzelt 1973; Furrer & Holzhauser 1984; Holzhauser 1984; Holzhauser 1992), sur les variations de la limite supérieure des arbres dans les Alpes et le Jura (Wegmüller 1966; Wegmüller 1977; Patzelt 1980; Burga 1988; Richard 1992; Schoellammer 1992), sur les variations des niveaux lacustres (Joos 1987; Magny 1992a; Magny 1992b; Magny 1993), sur l'épaisseur des cernes des arbres (Bircher 1982; Renner 1982; Lambert et al. 1992). Des recherches centrées sur les rapports des isotopes stables de l'oxygène et du carbone de la craie lacustre ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) ont été menées dans de nombreux lacs suisses et se sont principalement concentrées sur la période Dryas ancien - Préboréal (Eicher & Siegenthaler 1976; Eicher et al. 1981; Lotter et al. 1992) ainsi que sur les derniers siècles (McKenzie & Hollander 1993). Une rétrospective de la recherche en Suisse concernant ces reconstitutions paléoclimatiques est présentée notamment par Furrer et al. (1987). Gamper & Sutter (1982) ainsi que par Burga & Furrer (1982). Pour la période allant du Moyen Age à nos jours, les recherches s'orientent également vers les sources historiques (Pfister 1987; Grove 1988; Pfister et al. 1994).

Ces reconstitutions paléoclimatiques se heurtent souvent à plusieurs problèmes; corrélations, datations (surtout concernant les périodes d'avance des glaciers), médiocre connaissance des processus en cause, influence anthropique (concernant notamment l'évolution récente de la végétation), etc.

Cependant, certaines phases de péjorations climatiques sont plus ou moins bien documentées:

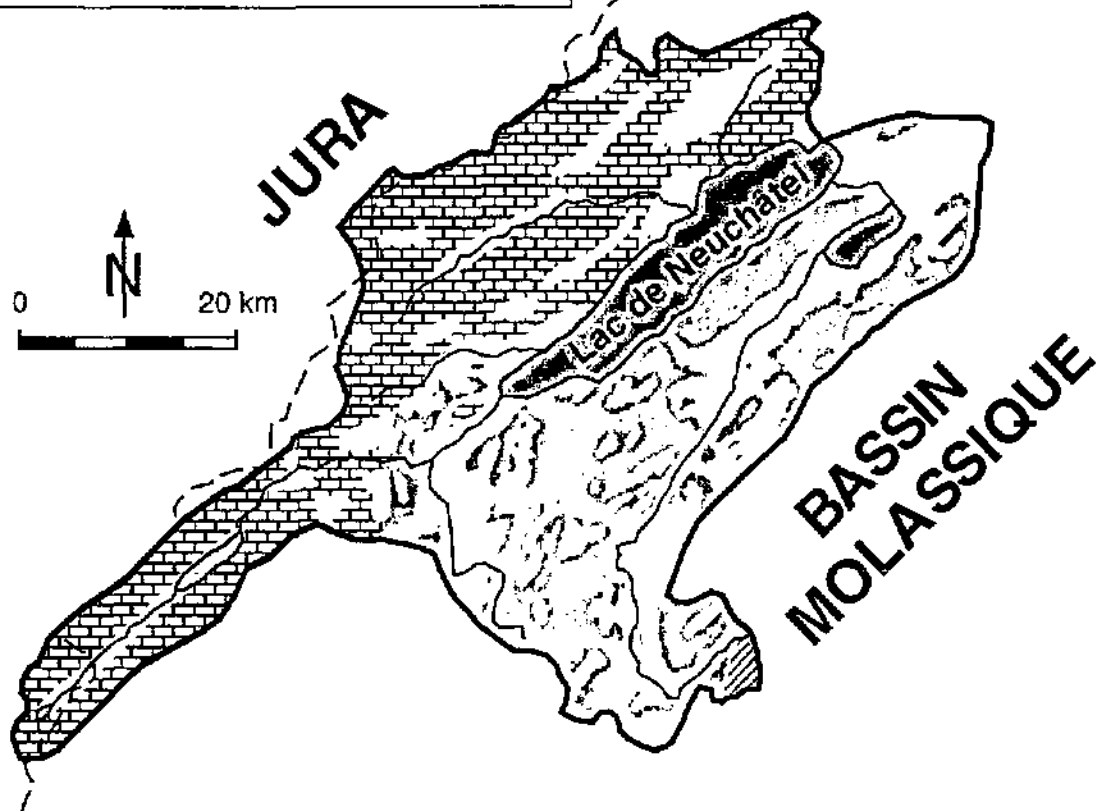
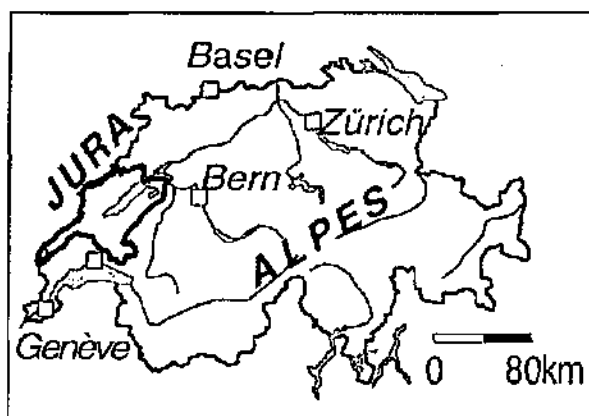
- Phase de Rotmoos I et 2 (avancée des glaciers; Alpes autrichiennes)(Patzelt 1977) qui se corréle au niveau de la végétation avec les phases de Piora I et 2 dans les Alpes suisses; se corréle également avec les phases transgressives des lacs du Jura du Grand Maclu et de Chalais (fin de l'Atlantique récent);
- Phase de Lössen (avancée des glaciers; Alpes autrichiennes)(Patzelt 1977); corrélee dans les lacs du Jura avec la phase transgressive de Pluvius; datée 3'350-3'150BP (fin du subboréal);
- Phase de Göschenen I (chute de la limite altitudinale de la forêt, Alpes suisses)(Zoller et al. 1966; Zoller 1977); corrélee dans les lacs du Jura avec la phase transgressive du Bourget; datée 2'830-2'270BP (début du Subatlantique ancien; premier âge du Fer et début de la période de la Tène);
- Phase du Petit Maclu I (phase transgressive dans les lacs du Jura); débute fin du premier siècle avant J.-C. pour se terminer au II^e siècle après J.-C.; plus ou moins corrélee avec les courbes d'épaisseur des cernes des arbres;
- Phase de Göschenen II (chute de la limite altitudinale de la forêt, Alpes suisses)(Zoller et al. 1966; Zoller 1977); corrélee dans les lacs du Jura avec la phase transgressive du Petit Maclu 2; datée 1'600-1'200BP;
- Petit Age Glaciaire: 3 périodes d'avancée des glaciers: XIV^e siècle, début XVII^e et au milieu du siècle passé; corrélation avec l'épaisseur des cernes des arbres.

Mentionnons encore que ces phases de péjoration climatique n'ont pas été clairement retrouvées par l'analyse des isotopes stables de l'oxygène.

Des phases d'optimum climatique ont également été reconnues:

- Optimum médiéval, daté environ 900-1300AD, période de récoltes abondantes en Europe, période de colonisation par les Vikings de l'Islande et du Grönland et période durant laquelle la culture de la vigne a pu avoir lieu beaucoup plus au nord qu'actuellement (Pfister 1987; Grove 1988).

En résumé, il paraît raisonnable de considérer le climat tardi-holocène comme relativement stable, ponctué toutefois d'une succession de péjorations et d'améliorations climatiques d'ampleur limitée.



- - - Frontière internationale
-  Dépôts quaternaires (moraines, dépôts fluvioglaciaires, alluvions,...)
-  Tertiaire (Molasse d'eau douce inférieure et Molasse marine supérieure)
-  Jurassique et Crétacé
-  Ultrahelvétique et nappe du Gumigel

Fig.1.1. Localisation du lac de Neuchâtel et aperçu de la géologie de son bassin versant (modifié d'après Schwalb, 1992)

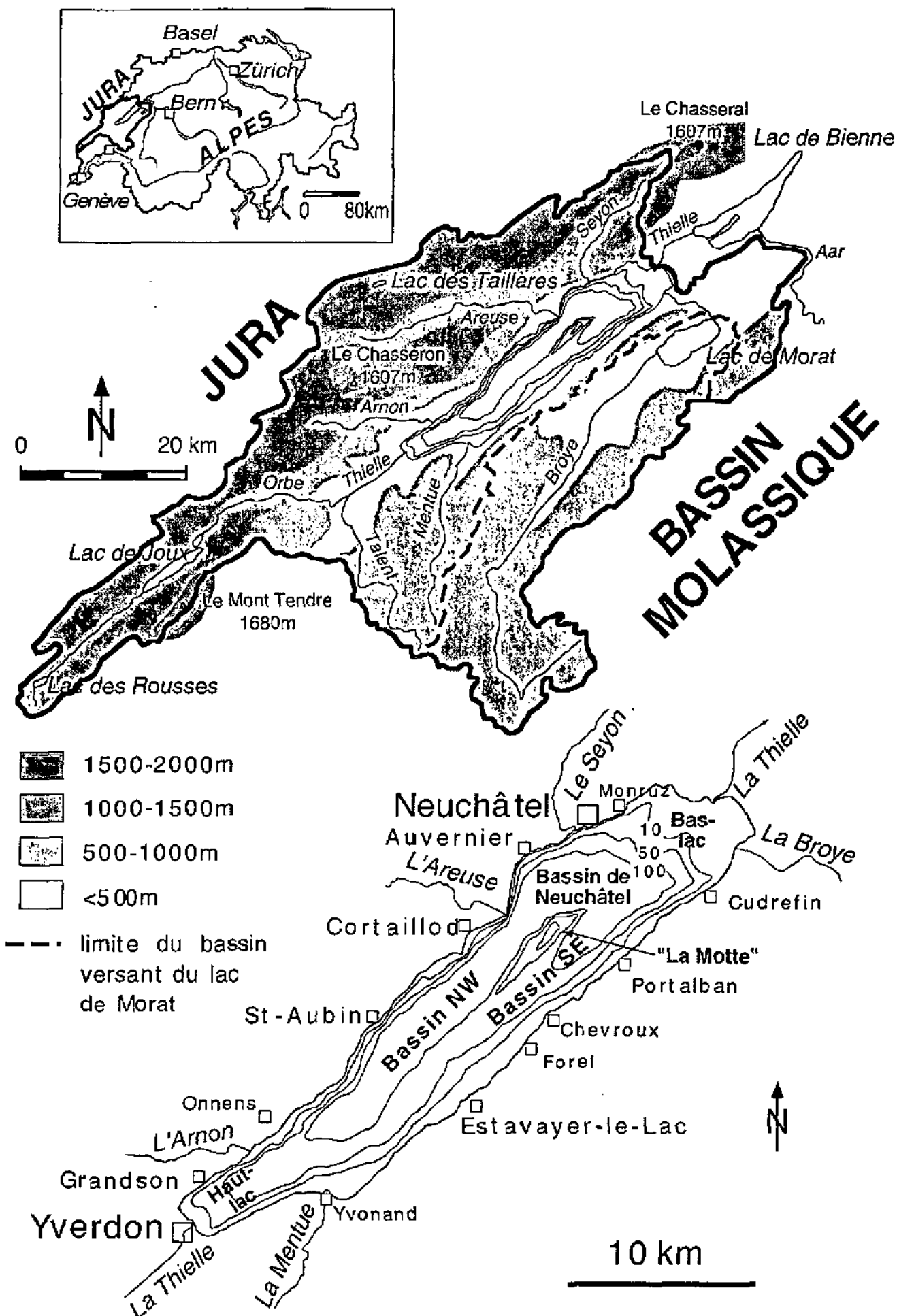


Fig.1.2. Topographie et réseau hydrographique du bassin versant; bathymétrie simplifiée du lac

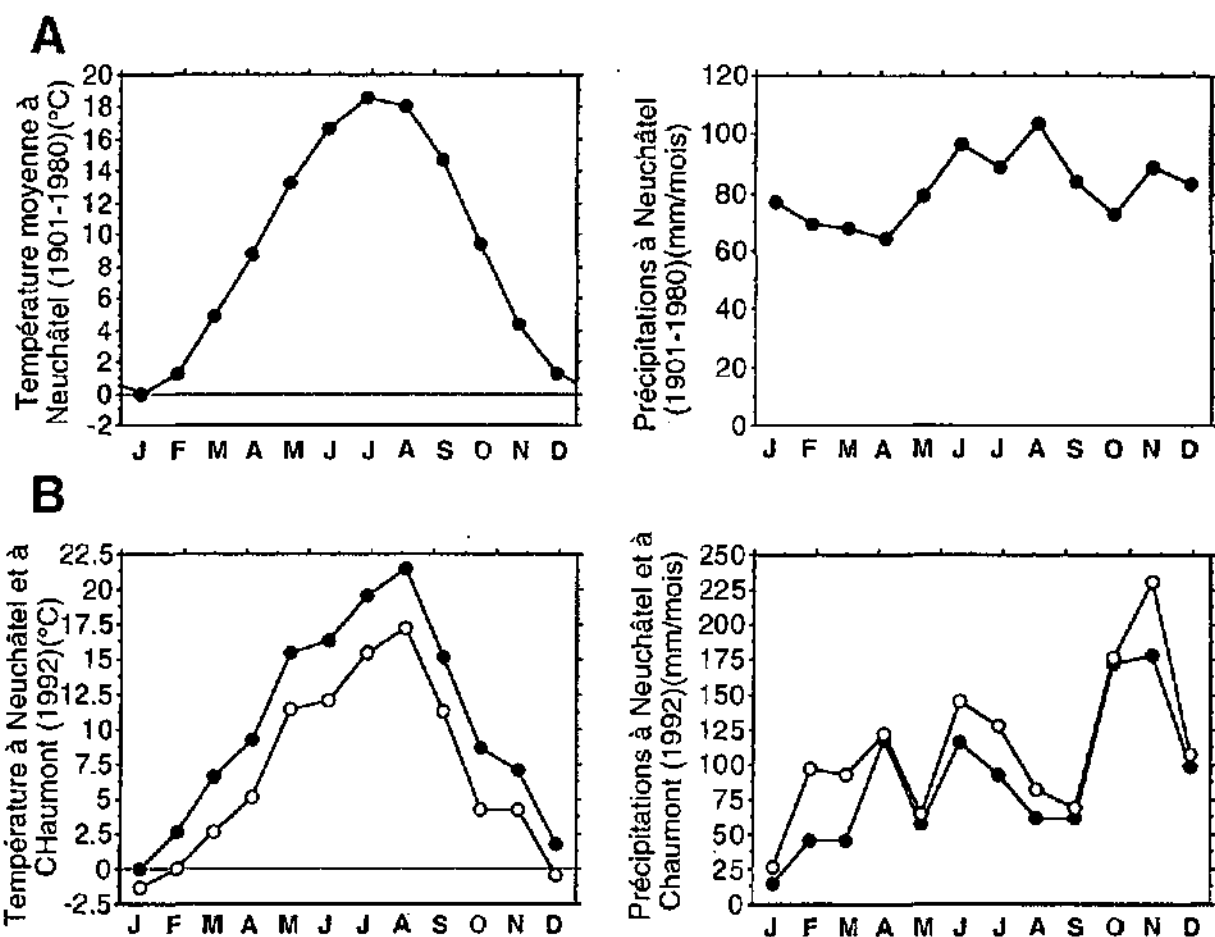


Fig.1.3. A) Evolution de la température et des précipitations mensuelles moyennes à Neuchâtel; la période 1901-1980 est considérée; B) Comparaison des évolutions saisonnières de la température et du volume des précipitations à Neuchâtel (480m; cercles pleins) et à Chaumont (1132m; cercles vides); seule l'année 1992 est considérée

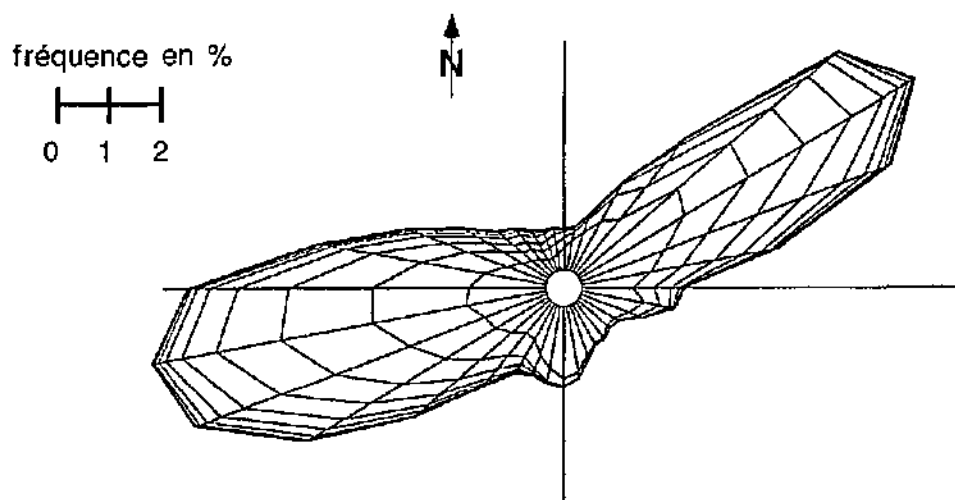


Fig.1.4. Rose des vents établie pour la période 1978-1990, station de Neuchâtel; le polygone intérieur représente la fréquence des vents d'intensité comprise entre 1 et 2m/s, le suivant les vents compris entre 2 et 3m/s et ainsi de suite. En ce qui concerne les vents d'intensité faible (<2m/s), on remarquera la fréquence plus élevée de la bise (secteur NE) par rapport au vents d'ouest, l'observation contraire étant valable pour les vents d'intensité plus élevée

CHAPITRE 2

Méthodologie

2.1. Méthodes d'analyses physiques et chimiques de l'eau

Paramètres physico-chimiques de l'eau

Les campagnes de mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau ont été réalisées à l'aide d'une sonde multiparamètre OTS-094 de l'entreprise Mecrestechnik Elektronik GmbH, couplée à un diffusiomètre Züllig et à un fluorimètre "BackScat" Dr.Haardt (modèle 1121.1). Le dispositif permet de mesurer la pression, la température, le pH, la concentration en oxygène dissous, la conductivité électrique, la concentration en chlorophylle-a ainsi que de la turbidité.

Le fluorimètre Dr.Haardt est conçu de manière à ce que les axes optiques d'excitation et de détection sont parallèles et situés dans un seul corps instrumental. L'émission maximale de la chlorophylle-a à 685nm est utilisée pour la détection. Ce fluorimètre permet également la mesure simultanée de la turbidité. Le détecteur mesure la part de la lumière émise (à 520nm) qui est rétrodiffusée sous un angle de 175 degrés ($\pm 5^\circ$). Les mesures s'expriment en unités de réflectance. La calibration a été réalisée par le fabricant, un standard définissant le 100% de réflectance et des atténuateurs étant utilisés pour les échelles de 1%, 0.1% et 0.01%.

Le second appareil de mesure de la turbidité utilisé est un néphélomètre Züllig AG. Il s'agit d'une version réalisée par PROSPER (Groupe de recherches océanographiques associé à l'Université de Neuchâtel), selon un concept développé par L.Prieur (LCPM Villefranche-sur-mer)(Vangriesheim et al. 1992). Cet appareil mesure la diffusion vers l'avant d'une lumière émise à 630nm. Le faisceau lumineux parcourt une distance de 28cm, où deux photodiodes reçoivent la lumière provenant d'un cône de 6° d'ouverture. Les courants créés par la lumière transmise ($0-2^\circ$) et la lumière diffusée ($2-6^\circ$) sont enregistrés sous deux codes, respectivement "référence" et "mesure". La turbidité s'exprime par le rapport entre lumière diffusée et lumière transmise, soit mesure/référence (M/R). Pour les faibles concentrations particulières, ce rapport est proportionnel au coefficient de diffusion du milieu.

L'appareil a été étalonné en laboratoire à l'aide d'une solution chimique standard de formazine (un seul étalonnage), qui correspond à un mélange de sulfate d'hydrazine et d'hexaméthylène tétramine. L'étalonnage est basé sur l'adjonction répétée de formazine à de l'eau filtrée et dégazée. Les unités s'expriment en FTU (Formazin Turbidity Unit).

Traitement des données hydrologiques

Le traitement des données a été géré par Laurent Marguet, qui a notamment mis au point les routines pour la représentation des données à l'aide du logiciel UNIMAP (UNIRAS).

Analyses chimiques de l'eau

Les analyses chimiques de l'eau ont été effectuées selon les méthodes de routine du Lasur (Laboratoire de chimie de l'Institut de Géologie de Neuchâtel).

L'alcalinité ou titre alcalimétrique complet (TAC) correspond à la concentration en bicarbonates et carbonates dissous ($[\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$). A un pH inférieur à 8.3, la totalité des carbonates sous la forme HCO_3^- . L'analyse est réalisée par titrage avec HCl 0.1N. Le Ca et le Mg sont déterminés par complexométrie (Metrohm-Titroprozessor). Les teneurs en éléments nutritifs, nitrates, orthophosphates et silice, et autres anions sont déterminées par colorimétrie automatique (FIAstar, Tecator: FIAstar 5010 Analyser + spectrophotomètre FIAstar 5023). Ces méthodes ont été mises au point par Ruzicka & Hansen (1981).

Mesure de la charge en suspension

La charge de matière particulaire en suspension (MES) a été déterminée par filtration à l'aide d'une pompe à vide d'un volume d'eau compris entre 4 et 6l sur des filtres Millipore HVLP (fluorure de polyvinylidène) $0.45\mu\text{m}$, de 47mm de diamètre. Une erreur de mesure de 0.3 [mg] lors du pesage des filtres peut être avancée, ce qui entraîne une erreur de 0.1 [mg/l] sur l'estimation de la concentration particulaire.

Détermination de l'indice de saturation de la calcite

L'indice de saturation de la calcite a été déterminé à l'aide des mesures de concentration en calcium dissous, d'alcalinité ($[\text{HCO}_3^-] \equiv \text{alc}$, alcalinité totale pour un pH compris entre 6.5 et 8.5)(Kelts 1978), de pH et de température. Les calculs ont été réalisés grâce au programme Hydrowin (Calmbach 1994).

Chapitre 2: Méthodologie

Le produit des activités ioniques $IAP = (Ca^{2+})(CO_3^{2-})$ comparé à la constante d'équilibre K_c (dépendante de la température) indique si l'eau est sursaturée, saturée ou sous-saturée par rapport à la calcite.

Indice de saturation $SI = IAP/K_c$

$$IAP = (Ca^{2+})(CO_3^{2-}) \quad (2-1)$$

L'activité de l'ion carbonate n'étant pas obtenue par des mesures directes, sa valeur doit être calculée sur la base de sa relation d'équilibre avec les ions bicarbonate. La distribution du carbone inorganique dissous dans une solution est gouvernée par l'équilibre des carbonates:

$$K_{CO2} = (H_2CO_3)/P_{CO2} \quad (2-1)$$

$$K_1 = (H^+)(HCO_3^-)/(H_2CO_3) \quad (2-2)$$

$$K_2 = (H^+)(CO_3^{2-})/(HCO_3^-) \quad (2-3)$$

$$K_c = (Ca^{2+})(CO_3^{2-}) \quad (2-4)$$

Par substitution on obtient:

$$(Ca^{2+})(HCO_3^-)^2/P_{CO2} = K_c K_1 K_{CO2}/K_2 \quad (2-5)$$

La relation entre P_{CO2} et le pH est la suivante:

$$(H^+)^3 = P_{CO2} * (K_1^2 K_2 K_{CO2} \gamma_{Ca^{2+}})/(2 K_c \gamma_{HCO_3^-}) \quad (2-6)$$

Le calcul des coefficients d'activité est dans ce cas réalisé par processus itératif.

Les activités des ions sont obtenues à partir des concentrations:

$$(Ca^{2+}) = [Ca^{2+}] * \gamma_{Ca^{2+}} \quad (2-7)$$

(activité = concentration * coefficient d'activité)

Le coefficient d'activité est obtenu par l'équation de Davies:

$$\gamma = -A Z^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.3 I \right) \quad (2-8)$$

A: constante dépendante de la température pour un solvant donné

Z: valence de l'ion

I: force ionique de la solution, somme des produits de la concentration molaire (m) et de la valence (Z) des ions en solution (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-):

$$I = 1/2 \sum m_i Z_i^2 \quad (2-9)$$

Le calcul des constantes d'équilibre en fonction de la température se fait par l'équation de Van't Hoff.

2.2. Méthodes d'analyses physiques et chimiques des sédiments et des particules en suspension

2.2.1. Méthodes d'analyses physiques

Susceptibilité magnétique volumique

La susceptibilité magnétique est un paramètre physique de la matière. Lorsqu'une substance est placée dans un champ magnétique H, appelé champ inducteur, elle acquiert un certain degré d'aimantation induite M, proportionnelle au champ inducteur H. La SMV du corps est le rapport:

$$k = M/H \quad [\text{sans unités}] \quad (2-10)$$

qui traduit le nombre de dipôles magnétiques par unité de volume, ainsi que leur mobilité à s'orienter sous l'action d'un champ externe.

La mesure a été effectuée à l'Institut de Géologie de l'ETH-Zürich, sur les tubes des carottes, avant leur ouverture, ou sur des moitiés de carottes avant échantillonnage. La résolution spatiale de l'appareil est de l'ordre de 2cm.

Teneur en eau et porosité

4cm³ prélevés à l'aide de seringues aux extrémités sciées ont été pesés puis placés durant 24h dans une étuve à une température de 110°C. Le sédiment sec a été à nouveau pesé, la différence de poids correspondant à la perte en eau.

Les formules suivantes permettent le calcul de la teneur en eau et de la porosité:

$$Te = 100 * (Ph - Ps) / Ph \quad [\%] \quad (2-11)$$

Te: teneur en eau

Ph: poids du sédiment humide

Ps: poids du sédiment sec

$$\Phi = (100 \cdot T_c) / (T_c + ((100 - T_c) / \rho))$$

(2-12)

Φ : porosité

ρ : poids spécifique (estimé à 2.6[g/cm³])

Le calcul de la porosité postule que les pores sont en totalité remplis d'eau (poids spécifique égal à 1[g/cm³]).

Préparation du matériel récolté par pièges à sédiments

Lors du relevé des pièges, le matériel sédimenté dans le collecteur d'une contenance d'environ 11 situé à la base de chaque piège (Fig.4.5.) est remis en suspension dans l'eau surnageante (env.1l). Cette suspension est centrifugée en laboratoire, le sédiment récupéré à l'aide d'eau désionisée étant ensuite tamisé à 150µm. Le résidu de tamisage (>150µm), composé essentiellement de zooplancton et de divers autres organismes vivants, est éliminé. Le sédiment est ensuite séché à l'étuve à 50°C.

Analyses granulométriques

L'analyse granulométrique des particules en suspension dans l'eau du lac et dans les affluents, du matériel des pièges à sédiments et des carottes courtes a été réalisée à l'aide d'un granulomètre à faisceau laser "Galai CIS-1 Oriel" de LOT GmbH. Cet appareil permet de mesurer les tailles de particules comprises entre 0.5 et 150µm. Un laser à He-Ne avec un faisceau rotatif est pointé sur une chambre à travers laquelle la suspension circule à vitesse constante (méthode du "liquid flow" en circuit fermé). Le passage d'une particule devant le faisceau crée une ombre sur le détecteur permettant ainsi de déterminer sa taille. Une description détaillée de la méthode est présentée par Jantschik et al. (1992). La seconde méthode à disposition qui consiste à mettre du sédiment en suspension dans un petit volume d'eau (cuvette) a été abandonnée du fait de la difficulté d'obtenir des résultats reproductibles (cf Annexe 2.1.: augmentation des tailles au cours de l'analyse dans le cas de la mesure à l'aide de la cuvette).

L'eau du lac a été analysée sans traitement, alors que le matériel des pièges à sédiments a été mis à réagir avec de l'eau oxygénée à 10% pendant 24h, afin de désagréger les floes organo-minéraux (cf. reproductibilité sans et avec H₂O₂, Annexe 2.1.). Le sédiment des carottes courtes a été remis en suspension dans de l'eau désionisée et passé à la cuve à ultrasons pendant une minute (cf. tests à l'Annexe 2.1.).

Microscopie électronique à balayage

Le matériel des pièges à sédiments, de suspensions des eaux du lac récoltées sur filtres, ainsi que des carottes courtes a été étudié au microscope électronique à balayage (Institut de Zoologie de l'Université de Neuchâtel et Institut de Géologie de l'Université de Berne).

En ce qui concerne les pièges à sédiments et les carottes courtes, le sédiment sec a été mis en suspension dans de l'eau désionisée (amenée à pH7) et la fraction inférieure à 2µm éliminée par centrifugation. Le culot remis en suspension a ensuite été filtré, et le filtre collé sur les porte-objets utilisés pour l'analyse.

2.2.2. Diffractométrie des rayons X

La diffractométrie des rayons X permet la détermination des minéraux présents et de quantifier leurs proportions (approche semi-quantitative).

Les analyses ont porté sur:

- les particules en suspension: un volume fixe (généralement 5l d'eau) est filtré sur des filtres de 47mm de diamètre (Millipore 0.45µm; fluorure de polyvinylidène). Le matériel récolté est ensuite remis en suspension avant séchage et filtré sur des membranes en argent, elles-mêmes collées sur des plaques en verre pour l'analyse au diffractomètre.

- les suspensions des affluents, le matériel récolté dans les pièges à sédiments et le sédiment. La préparation suit les méthodes de routine du Laboratoire de Minéralogie et de Pétrographie de l'Institut de Géologie (LMPG);

- analyse sur poudres non orientées ("sédiment total"): environ 800mg de matériel préalablement homogénéisé dans un mortier à agate manuel sont pressés sous 20 bars dans des porte-objets.

- analyse des préparations orientées des fractions <2µm et 2-16µm: après décarbonatation, la séparation des fractions est réalisée par centrifugation selon la méthode de Rumley & Adatte (1983).

Les analyses diffractométriques ont été réalisées à l'aide d'un Scintag XRD 2000. Les réglages de l'appareil sont les suivants: radiation Cu-K α , 45kV, 40mA, vitesse du goniomètre: 1°2 θ /min. La détermination des minéraux est facilitée par la possibilité de désommer les pics (déconvolution) à l'aide d'une fonction mathématique (Pearson). Le dosage semi-quantitatif des préparations non orientées ("sédiment total") utilise la méthode de l'étalon externe avec appréciation du coefficient d'absorption massique de l'échantillon (Ferrero 1965; Klug & Alexander 1974; Kübler 1983). Les calculs sont effectués à l'aide du programme basique McDosage (Rolli 1990). La proportion d'indosés a été répartie proportionnellement sur les minéraux présents. Pour les fractions <2µm et 2-16µm, la quantification des minéraux argileux a été réalisée par dosage relatif, en sommant les intensités des raies principales des différents minéraux. Le chimisme des micas a été déterminé par la méthode de Roy & Kübler (1983).

2.2.3. Méthodes d'analyse géochimique des sédiments

Détermination des teneurs en C, H et N élémentaires

Elles sont effectuées par chromatographie en phase gazeuse impliquant la combustion totale de l'échantillon. L'appareil utilisé est un Carlo Erba EA 1108. Certains échantillons ont été analysés à deux reprises lors de séries de mesures différentes ce qui permet d'avoir une idée de l'erreur relative sur la mesure; celle-ci est estimée inférieure à 15% pour l'azote et à 1.5% pour le carbone.

Détermination des teneurs en carbone organique, carbone inorganique et azote inorganique

Elle a été effectuée à l'Institut Forel, à Versoix. Il s'est agi d'une méthode titrimétrique impliquant l'oxydation de la matière organique par du bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) (équation 2-13) et la titration de l'excès d'oxydant par du sulfate de fer (équation 2-14) (Gaudette et al. 1974).



La teneur en carbone organique se calcule alors selon:

$$\% C_{org} = N (V_{blanc} - V_{sédiment}) * 0.3 / prise \quad (2-15)$$

où:

N = normalité de la solution de $FeSO_4$; V_{blanc} , $V_{sédiment}$: volumes de $FeSO_4$ (ml) utilisés pour titrer respectivement un échantillon blanc ou un échantillon de sédiment; prise: masse de sédiment (g).

Environ 50 à 100mg de sédiment ont été analysés. L'écart-type de 8 mesures effectuées sur un échantillon de référence s'établit en valeur absolue à 0.09%, soit 3.5% en valeur relative. L'erreur sur les échantillons de sédiment est estimée comme étant égale au double de cette valeur, soit 7% (erreur relative).

Seule la teneur en carbone organique de la carotte C18 a été analysée par une méthode différente, soit par analyse élémentaire C,H,N sur le résidu insoluble. Cette méthode a été abandonnée car elle sous-estime les teneurs, une partie du carbone organique étant solubilisée lors de l'attaque avec HCl 1N.

La teneur en carbone inorganique est obtenue par différence:

$$C_{min} = C_{tot} - C_{org} [\%] \quad (2-16)$$

Le pourcentage de carbonates est calculé selon un rapport normé à la calcite, soit:

$$Carbonates = C_{min} * (100.08/12) [\%] \quad (2-17)$$

Le pourcentage de résidu insoluble est ensuite également obtenu par différence:

$$RI = 100 - Carbonates - m.o. [\%] \quad (2-18)$$

où m.o., soit le pourcentage de matière organique, est estimé comme étant égal à $2 * C_{org}$.

L'azote inorganique est constitué principalement de ions NO_3^- et NH_4^+ , adsorbés par les argiles. L'extraction de ces ions a été réalisée par KCl 15%. Le produit d'extraction est ensuite filtré et la solution obtenue distillée (Büchi 430 digester). L'ammoniaque est entraîné dans une solution d'acide borique, titrée par HCl 0.01N, puis les nitrates sont transformés en NH_4^+ (alliage Dewarda) et la solution d'acide borique titrée de la même manière. Les analyses ont été effectuées au Laboratoire d'Ecologie végétale de l'Université de Neuchâtel. Entre 2 et 4g de sédiment sec ont été utilisés pour l'analyse.

Géochimie des éléments majeurs (phase acidosoluble)

L'analyse géochimique des éléments majeurs est effectuée selon la méthode de routine du LMPG (Laboratoire de Minéralogie et de Pétrographie de l'Institut de Géologie) (Beck 1987). Environ 1g de sédiment préalablement séché et homogénéisé au mortier manuel à agate est attaqué à HCl 1N pendant 30 minutes à 80°C sous agitation. Le produit de l'attaque est ensuite filtré et le filtrat amené à un volume fixe en vue des analyses ultérieures. Le résidu insoluble récolté sur le filtre est rincé abondamment, séché puis pesé et rapporté au sédiment total. Les teneurs en Mg, Sr, Mn, Fe, K sont déterminées par spectrométrie d'absorption atomique de flamme (Perkin Elmer 5100). Les teneurs en SiO_2 , PO_4 (orthophosphates) et Al sont déterminées par colorimétrie automatique (FIAstar, Tecator: FIAstar 5010 Analyser + spectrophotomètre FIAstar 5023) et Ca par complexométrie (Metrohm-Titroprozessor). Cette méthode ne permet pas une attaque complète du sédiment. L'attaque à l'acide chlorhydrique solubilise principalement les cations qui proviennent de la phase carbonatée. Elle libère cependant également partiellement les éléments chimiques d'autres phases minérales ou amorphes, minéraux argileux, phosphates, silice, hydroxydes, ainsi que des éléments liés à la matière organique (Kübler et al., 1979).

2.2.4. Détermination du taux de sédimentation

Le taux d'accumulation récent a été estimé par les méthodes radioisotopiques ^{137}Cs et ^{210}Pb sur la carotte C37. Le ^{137}Cs est un isotope radioactif artificiel. Les pics d'activité du ^{137}Cs sont liés aux essais nucléaires atmosphériques dont les retombées ont été maximales vers 1963-1964 (Ritchie & McHenry 1990) (maxima estimé au 1er janvier 1964 lors de notre étude) ainsi que suite à l'accident nucléaire de Tchernobyl (maxima des

retombées estimé au 1er mai 1986). L'activité du ^{137}Cs a été déterminée par spectrométrie des rayons gamma sur le sédiment brut (séché, homogénéisé) d'après la méthode de Dominik et al. (1987).

Le plomb-210 est un isotope radioactif naturel de la série de l'uranium-238. Sa demi-vie est de 22.3 ans. Il est produit dans l'atmosphère par la désintégration du radon-222 (^{222}Rn) qui s'échappe du sol et il parvient au sédiment principalement par les précipitations, bien que d'autres modes de transport soient possibles (affluents). Une autre source de ^{210}Pb est constituée par la désintégration du radium-226 (^{226}Ra) au sein du sédiment. Le plomb-210 produit dans le sédiment par la désintégration du radium reste en équilibre avec celui-ci, alors que ^{210}Pb atmosphérique se désintègre sans être alimenté par ses précurseurs. La diminution de l'activité du ^{210}Pb en excès avec la profondeur ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}$) permet de calculer le taux de sédimentation en postulant une concentration initiale constante du ^{210}Pb dans le sédiment (cf. Oldfield & Appleby 1984):

$$\ln(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})_n = \ln(^{210}\text{Pb}_{\text{ex}})_0 - (\lambda_{210}/\text{TS})M \quad (2-19)$$

TS: taux de sédimentation [$\text{gcm}^{-2}\text{an}^{-1}$], M: masse de sédiment sec [gcm^{-2}] entre les niveaux 0 et n, λ_{210} la constante de décroissance du $^{210}\text{Pb} = 0.03108/\text{an}$.

L'activité ^{210}Pb a été déterminée indirectement par la mesure du ^{210}Po par spectrométrie des rayons gamma selon la méthode décrite par Dominik et al. (1987).

Le taux de sédimentation plus ancien (Subboréal-Subatlantique) a été estimé sur la carotte LN01 en se basant sur les datations AMS- ^{14}C de notre étude et de Schwalb (1992), et sur les corrélations entre carottes (méthode du carbone total, cf. Fig.5.). Le taux d'accumulation entre deux niveaux datés est alors donné par:

$$\text{Tacc} = \text{Ts}[\text{cm/an}] * \rho_s * (1-\Phi) \quad (2-20)$$

Tacc: taux d'accumulation [gcm^{-2}an]

Ts: taux d'accumulation [cm/an]

ρ_s : densité du sédiment, estimée à $2.6 [\text{gcm}^{-3}]$

Φ : porosité

2.2.5. Analyse des isotopes stables du carbone et de l'oxygène

Les analyses sur carbonates totaux ont été effectuées à l'Institut de Minéralogie et de Pétrographie de l'Université de Lausanne par Maria Letizia Filippi. Les coquilles d'ostracodes ont été analysées à l'Institut de Géologie de l'ETH-Zürich.

Concernant les sédiments (pièges et carottes courtes), la procédure est la suivante: l'échantillon de sédiment sec préalablement homogénéisé est mis au contact d'acide phosphorique 100%, selon une procédure standard décrite par McCrea (1950). Afin de déterminer l'effet de la présence de matières organiques, certains échantillons ont été traités avec NaOCl durant env. 15h (Charef & Sheppard 1984), puis lavés à quatre reprises avec de l'eau désionisée et séchés à 80°C pendant 4h. Les résultats ne varient pas de manière significative par rapport à la procédure normale ($<0.2\%$), ce qui indique que la matière organique n'influence pas le rapport isotopique des carbonates. Des facteurs de fractionnement de 1.01025 à 25°C (Sharma & Clayton 1965) et de 1.00931 à 50°C (Swart et al. 1991) ont été utilisés pour tenir compte de la réaction entre CaCO_3 et H_3PO_4 . Les échantillons d'eau sont quant à eux équilibrés avec du CO_2 pendant 12h à 25°C . Le CO_2 ainsi équilibré est ensuite extrait et analysé en tenant compte d'un facteur de fractionnement de 1.0412 entre CO_2 et H_2O (O'Neil et al. 1975).

Les rapports isotopiques sont déterminés à l'aide d'un spectromètre de masse Finnigan MAT 251, calibré à intervalles réguliers avec le standard international NBS 19 (Coplen et al. 1983). La déviation standard de l'analyse s'élève à $\pm 0.1\%$ pour $\delta^{18}\text{O}$ et à $\pm 0.05\%$ pour $\delta^{13}\text{C}$.

La préparation des valves calcitiques des ostracodes pour l'analyse des isotopes stables de l'oxygène et du carbone a impliqué un lavage avec de l'eau désionisée additionnée d'eau oxygénée (concentration 5%) pendant 15mn et un nettoyage à l'aide d'un pinceau fin. Des valves de *Candona neglecta* (présence possible de *Candona studei* parmi elles), juvéniles en majorité accompagnés d'adultes de manière indifférenciée, ont été sélectionnées pour l'analyse des isotopes stables. Entre 10 et 20 valves ont été analysées par échantillon. Avant l'analyse, les échantillons ont encore été placés pendant 1h dans un four à 400°C et sous vide d'air afin de supprimer les restes éventuels de matière organique. Les compositions isotopiques du carbone et de l'oxygène des coquilles sont déterminées après réaction avec de l'acide phosphorique 100% à 90°C ($\alpha_{\text{carbonate}-\text{CO}_2} = 1.0076$) sur un spectromètre de masse VG-Prism équipé d'un système automatique de préparation des échantillons dans un bain acide commun (Geologisches Institut, ETH Zürich). Le spectromètre est calibré avec les standards NBS 18, 19 et 20. La reproductibilité analytique est meilleure que ± 0.07 et $\pm 0.1\%$ pour respectivement le carbone et l'oxygène.

Tous les résultats sont présentés en pour mille (‰), notation relative au standard de la formation "PDB belemnite" pour les carbonates et au standard "SMOW" pour l'eau (Craig 1957):

$$\delta\text{‰} = [(R_{\text{échantillon}} - R_{\text{standard}})/R_{\text{standard}}] * 1000 \quad (2-21)$$

où R correspond au rapport ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) ou ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$).

2.2.6. Paléolimnologie

Assemblages fossiles d'ostracodes

Entre 10 et 20g de sédiment humide ont été prélevés par échantillon. Deux comptages des valves ont été effectués, l'un sur la fraction $>200\mu\text{m}$ l'autre sur la fraction $>63\mu\text{m}$. Entre 400 et 1000 valves ont été comptées. La détermination des espèces a été effectuée par Walter Geiger, de l'Institut für Limnologie der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, à Mondsee.

Analyse des diatomées

Les analyses ont été réalisées par Jean-Claude Druart, de l'INRA à Thonon-les-Bains (France). Le sédiment sec (1g) est attaqué à HCl 75% à chaud pendant 20min pour éliminer la fraction carbonatée et est ensuite mis à réagir avec de l'eau oxygénée pour faire de même avec la fraction organique. Après rinçage à l'eau distillée, des fractions de 0.2ml sont disposées sur des couvre-objets ronds de 16mm de diamètre. Après évaporation sur une plaque chauffante, la lamelle est fixée sur une lame enduite de Naphrax. L'examen des préparations est réalisé sur un microscope inversé Zeiss Axiovert 45. La teneur du sédiment en frustules est réalisée en comptant un nombre minimal de 500 frustules dans un poids de sédiment connu. Dans le cas de la carotte C19c, seuls les échantillons des intervalles L1 et L2 (proches de la surface du sédiment) ont permis de dénombrer ce chiffre minimal de 500 frustules.

Analyses polliniques

Les pollens du matériel des pièges à sédiments et de la carotte courbe C19c ont été analysés par respectivement Pascale Ruffaldi et Olivier Puertas, tous deux collaborateurs du Laboratoire de Chrono-Ecologie de l'Université de Franche-Comté, à Besançon. La préparation chimique des échantillons suit la méthode de Bastin et Coûteaux (1966). Le sédiment est mis à réagir avec HCl 0.5N pour éliminer les carbonates. Après rinçage, le résidu silicaté est éliminé par attaque à HF 40% dans des creusets en nickel. Le culot est rincé avec de l'acide chlorhydrique 10%, puis avec de l'eau distillée.

Pour faciliter la détermination des pollens actuels, une acétolyse est pratiquée afin de détruire l'intine et de colorer l'exine pour mettre en évidence les différentes structures.

Les comptages ont été effectués à l'aide d'un microscope Wild-Leitz, à un grossissement oscillant entre 312 et 500x. Une moyenne de 500 pollens par échantillon ont été comptés, 1000 pollens dans le cas où un taxon est fortement dominant.

CHAPITRE 3

Physico-chimie, turbidimétrie et paramètres biologiques des eaux du lac de Neuchâtel (juin 92-décembre 94)

3.1. Introduction

L'existence et la cause éventuelle de disparités spatiales des caractéristiques physico-chimiques de l'eau et de la production phytoplanctonique seront discutées au cours de ce chapitre.

En outre, les paramètres physico-chimiques des eaux et notamment la turbidimétrie nous seront utiles pour l'étude des processus actuels de la sédimentation.

Les résultats présentés dans ce chapitre représentent une partie de la recherche post-doctorale entreprise à l'Institut de Géologie par Florence Gendre. La présentation graphique des données a été grandement facilitée grâce au travail accompli par Laurent Marguet.

Evolution récente de l'état trophique du lac de Neuchâtel

Le lac de Neuchâtel, comme la plupart des lacs suisses de plaine, a récemment connu une phase d'eutrophisation qui a atteint sa culmination au cours des années 1970 (station de mesures au large d'Auvernier (120m))(Dubois & Schetty 1977; Pokorni 1983).

Depuis le début des années 1980, les concentrations en phosphore total et en orthophosphates ont suivi une courbe descendante (station de Treytel (Bevaix, 153m)) (Fig.3.1.): la concentration moyenne du lac en phosphore total est passée de 40µg/l en 1982 à 20µg/l en 1995, et les orthophosphates ont diminué dans le même temps de 25 à 5µg/l. La teneur en nitrates s'est stabilisée vers 1.0-1.1mgN/l depuis 1988 (Fig.3.2.A). La concentration en oxygène dissous à un mètre au-dessus du fond (Fig.3.3.A) est restée remarquablement stable, même durant les années 1970 et le début des années 1980. Elle n'a qu'exceptionnellement atteint des valeurs inférieures à 6mg/l, alors que la valeur moyenne est restée proche de 10mg/l. Durant la période 1989-1995, la concentration en chlorophylle s'est maintenue à un niveau modéré, excepté en 1995 où les valeurs enregistrées par le Service cantonal (neuchâtelois) de la protection de l'environnement ont plus que doublé par rapport aux années précédentes (Fig.3.3.B), sans que la cause puisse en être déterminée (station de Treytel (Bevaix, 153m)).

La liste de nos campagnes de mesures physico-chimiques (1992-1995) est présentée à l'Annexe 3.1., les cartes de situation des différents transects peuvent être consultées à l'Annexe 3.2.

3.2. Thermique

Le lac de Neuchâtel est un lac monomictique chaud. L'holomixie a lieu en début d'année, en janvier ou février (Fig.3.4.). Le printemps est marqué par l'établissement progressif de la stratification thermique qui atteint sa stabilité maximale en août. Le lac commence ensuite à restituer son énergie à son environnement, l'épilimnion s'épaissit et le gradient thermique entre épi- et hypolimnion va en s'amointrissant.

L'évolution saisonnière de la température est présentée à la Fig.3.4. La température maximale estivale a dépassé 23°C en 1992 et 1994 et 20°C en 1993, l'été ayant été moins clément cette année-là. L'homogénéisation hivernale a été complète chaque hiver, et la température minimale hivernale a approché 5.2°C en 1993 et en 94. A noter que des températures hypolimniques hivernales supérieures à 5°C ont déjà été observées dans les années 1980 (Livingstone 1993).

Un résumé de l'évolution saisonnière de la température pour l'année 1993 est présenté à la Figure 3.5. Le caractère instable de la stratification du premier printemps peut être apprécié d'après les profils présentés; du 4 mars au 8 avril, la température à 40m de profondeur ayant augmenté plus fortement que durant la période allant 8 avril au 18 août. L'approfondissement rapide des isothermes de 5.5 et 6°C durant les mois de mars-avril (Fig.3.4.) s'explique donc par une homogénéisation d'une grande partie de la colonne d'eau suite à des périodes de perturbations atmosphériques. La profondeur d'homogénéisation diminue ensuite au cours du printemps au fur et à mesure que le gradient de température s'accroît. L'épaisseur de la couche épilimnique se stabilise aux alentours de 10-15m au cours de l'été.

Au début du réchauffement printanier, un gradient horizontal de température est parfois observé, la température diminuant des rives vers le centre du lac (Fig.3.6.: côté NE et Fig.3.7.: rives NW et SE). Ce type de phénomène est bien connu dans les bassins de plus grande taille, tels les grands lacs américains, où une barre thermique peut subsister pendant plusieurs semaines (Wetzel 1983, p.125). Il peut avoir pour conséquence une production phytoplanctonique momentanément plus élevée à proximité des rives qu'au centre du lac (Figs.3.6. et 3.7.).

L'évolution journalière de la température lors de trois jours d'été est présentée à la Figure 3.8. Du matin à la fin de l'après-midi, la température s'accroît de 1-2°C dans le mètre supérieur de la colonne d'eau. Cette énergie

accumulée durant la journée est partiellement transférée par convection durant la nuit et mène à la formation matinale d'une couche thermiquement homogène de 3 à 5m d'épaisseur. Ce phénomène est plus amplement décrit par Imberger (1985).

Les ondes internes du Lac de Neuchâtel ont été décrites par Besson (1991), qui a mis en évidence des périodes propres de l'ordre de 8h (ondes transversales), 42h, 50h et 85h (ondes longitudinales). La Figure 3.9. présente un exemple d'onde interne longitudinale. Une inversion de la pente des isothermes est observée entre les campagnes des 29 et 30 juin 1993. La bise (vent d'est) a provoqué une accumulation d'eau chaude en surface dans la partie sous le vent du lac, situation instable qui, pour se rééquilibrer, a conduit à une oscillation de l'interface entre l'eau chaude et l'eau froide. L'intervalle d'une journée entre les deux campagnes de mesures correspond approximativement à une demi-période de l'onde interne, ce que confirment les calculs de Besson (1991); à une différence de température de l'ordre 15°C entre hypolimnion et épilimnion, correspond une période de l'onde interne d'environ 51h.

La répartition spatiale de la chlorophylle-a lors de ces deux journées consécutives est également influencée (Fig.3.9.).

L'oscillation de la masse d'eau est accompagnée d'un transfert horizontal non négligeable. Wetzel (1983) cite des valeurs de courants horizontaux supérieurs à 10cm/s près des noeuds d'ondes internes de l'ordre de 10m d'amplitude pour les lacs Michigan et Loch Ness. Dans le cas de l'onde interne présentée, les courants au niveau des noeuds des ondes peuvent être estimés de manière simple sur la base du volume d'eau transporté et en postulant que la période de l'onde est de 48h:

$$v_{\text{épi}} \text{ (m/s)} = (d_{\text{(e-c)}} * h_{T10(\text{e-c})}) / (T/2 * h_{\text{épi}}) \quad (3-1)$$

$$v_{\text{hypo}} \text{ (m/s)} = (d_{\text{(e-c)}} * h_{T10(\text{e-c})}) / (T/2 * h_{\text{hypo}}) \quad (3-2)$$

où:

- $v_{\text{épi}}$ et v_{hypo} sont les vitesses estimées des courants épi- et hypolimniques; - $d_{\text{(e-c)}}$ est la distance du centre (noeud de l'onde) à l'extrémité du lac (SW ou NE); - $h_{T10(\text{e-c})}$ correspond à la moitié de l'amplitude de l'onde, estimée d'après la différence de profondeur de l'isotherme de 10°C entre le centre du lac et ses extrémités (moyenne des deux extrémités); - T est la période de l'onde, estimée à 48h dans le cas présent; - $h_{\text{épi}}$ et h_{hypo} correspondent aux épaisseurs respectives de l'épi- et de l'hypolimnion.

Cette estimation postule un lac parfaitement rectangulaire, ce qui est une approximation acceptable pour le lac de Neuchâtel. En ce qui concerne des courants épilimniques de l'ordre de 7-8cm/s (équation 3-1) et des courants hypolimniques de 1.5-2cm/s (équation 3-2) peuvent être postulés.

L'importance des ondes internes est donc cruciale dans l'étude des paramètres physico-chimiques et biologiques des lacs. En comparant les résultats des stations 09 et 24 de la campagne 31 (Fig.3.11. et Tab.3.1.), on peut observer de fortes différences d'une station à l'autre au niveau des profils de température et de teneur en chlorophylle-a. Des observations identiques peuvent être faites pour les profils d'une même station à un jour d'intervalle. Les rapports de concentration en chlorophylle d'une station à l'autre ou d'un jour à l'autre pour une même station peuvent atteindre 250% sur la couche 0-30m.

station	T moy. 0-10m	T moy. 0-30m	Chl moy. 0-10m	Chl moy. 0-30m
09, campagne 29	18	10.7	2.14	1.37
09, campagne 31	17.2	15	2.78	2.97
24, campagne 29	19.1	15.9	1.82	2.19
24, campagne 31	15.6	9.7	2.14	1.22

Tab.3.1. Moyennes de température et de teneur en chlorophylle (0-10m et 0-30m) pour les stations 09 et 24 des campagnes des 29 et 30 juin 1993

Nous avons observé à plusieurs reprises une accumulation d'eau chaude en surface dans la partie sud-est du transect Cortaillod-Chevroux (Fig.3.12.). Un régime d'ouest ayant régné durant les jours qui précèdent ces campagnes, cette accumulation se fait dans la partie sous le vent du lac. Ce type de situation engendre donc un downwelling du côté sud-est du lac (Chevroux) et un upwelling du côté nord-ouest (Cortaillod). Le vent d'ouest étant le vent dominant (cf. paragraphe 1.2.; Fig.1.4.), cette situation pourrait refléter un trait général du régime hydrodynamique du lac (Cf. également paragraphe 4.4.9.). Le fait que les isothermes soient rapprochés dans la partie sous le vent du lac et qu'ils divergent en direction de la partie au vent est attribuable à une circulation en double-cellule, telle que celle schématisée à la Figure 3.12. La simulation numérique de la circulation prévoit une évolution similaire des isothermes lors de régimes de vent d'ouest (Thunus et al. 1994). Il est toutefois également possible que la répartition des isothermes à la figure 3.12. soit due à une onde interne.

3.3. Evolution temporelle et variabilité spatiale de la production phytoplanktonique

La production phytoplanktonique a été étudiée par l'intermédiaire de la teneur en chlorophylle-a, principal pigment algaire, ainsi que par l'analyse de la biomasse phytoplanktonique durant l'année 1993.

La chlorophylle-a est un indicateur de la biomasse phytoplanctonique, mais aussi un indicateur de son potentiel photosynthétique. Elle est présente dans toutes les algues, bactéries photosynthétiques exceptées (Wetzel 1983, p.343).

Deux développements phytoplanctoniques principaux ont eu lieu pour chacune des deux années d'étude, 1993 et 1994; un premier développement phytoplanctonique printanier en avril-mai et un deuxième fin juin - début juillet. La phase intermédiaire, communément dénommée phase des eaux claires, a eu lieu durant la deuxième moitié du mois de mai (Figs.3.13. et 3.14.). Plusieurs autres phases d'eaux claires de moindre amplitude se succèdent ensuite durant l'été, du moins en 1993 (Fig.3.14.). Il est généralement admis qu'elles sont dues à un important développement de zooplancton menant à un broutage du phytoplancton (Wetzel 1983, p.377). D'autres facteurs, principalement la disponibilité en sels nutritifs, peuvent toutefois avoir une action sur l'apparition de cette phase en favorisant une succession des espèces phytoplanctoniques (Wetzel 1983, p.375-6).

Certaines différences apparaissent d'une année à l'autre au niveau de l'évolution saisonnière de la teneur en chlorophylle-a. Ainsi, l'été 1992 a été marqué par des concentrations relativement élevées, avec des valeurs supérieures à 3µg/l jusqu'en septembre, et maintenues aux alentours de 2µg/l en octobre et novembre. Durant l'été 1993, les valeurs ont été légèrement plus faibles, mais supérieures à 2µg/l jusqu'en novembre, alors qu'elles n'ont guère dépassé 1.5µg/l durant l'été et l'automne 1994. Le développement phytoplanctonique de juin-juillet a été par contre relativement important par rapport aux deux années précédentes.

Les moyennes annuelles de la teneur en chlorophylle-a sont présentées au Tableau 3.2. Que ce soit pour la moyenne annuelle, la production printanière (PP) ou la production estivale (PE), elles ont tendance à diminuer entre 1992 et 1994 pour ce qui concerne la couche 0-10m. Ceci ne se vérifie pas concernant la couche de 10m d'épaisseur de concentration maximale. Il semble donc que la production phytoplanctonique se soit située à une profondeur légèrement supérieure en 1994 par rapport à l'année précédente. La production ayant fortement augmenté en 1995, avec une moyenne de la teneur en chlorophylle-a supérieure à 6µg/l (Service cantonal de la protection de l'environnement; Fig.3.3. et Tab.3.2.), les variations observées sont imputables à des variations interannuelles "normales" de productivité et ne permettent pas de rendre compte de la tendance à long terme vers une réoligotrophisation du lac.

année	campagnes/ mesures	couche 0-10m	couche 10m +	PE (0-10m)	PE (10m+)	PP (0-10m)	PP (10m+)	PP/PE (0-10m)	PP/PE (10m+)
1992				2.5	2.75				
1993	33/67	2.09	2.24	2.2	2.46	2.82	3.02	1.28	1.23
1994	22/57	1.84	2.16	1.98	2.6	2.39	2.75	1.21	1.06

données SCPE

1992	1.39
1993	2.02
1994	2.99
1995	6.49

Tab.3.2. Moyennes de la teneur en chlorophylle a de la couche 0-10m

et de la couche de 10m d'épaisseur de concentration maximale (10m+)(exprimées en µg/l);

Moyennes de la production estivale (PE: 1.6.-30.9.) et de la production printanière (PP: 1.3.-31.5.);

Le nombre de campagnes et de mesures impliquées dans les moyennes annuelles sont indiquées;

Comparaison avec les données du Service Cantonal de la Protection de l'Environnement (SCPE)

Les résultats des comptages de phytoplancton de l'année 1993 sont présentés à la Figure 3.15. Ils ont été effectués par J.-C. Druart, de l'Institut de Limnologie de Thonon-les-Bains. Les zygothécées et les dinophycées dominent le développement phytoplanctonique printanier; les dinophycées, relayées par les diatomées puis par les chrysophycées dominent la phase de juin-juillet; le mois d'août est marqué par la prédominance des chlorophycées, l'automne par celle des cyanophycées. La faible représentation des diatomées au printemps est contredite par les analyses d'autres échantillons (14.3.93 et 20.4.93) effectuées pour le SCPE par F.Straub. Elle est également contredite par la diminution épilimnique de la concentration en silice au cours du printemps 1993 (Fig.3.24.). Une succession rapide des espèces (Druart, comm.pers.) ou des répartitions spatiales particulières des différents taxons pourraient expliquer ce désaccord.

Sur 112 espèces inventoriées lors de 13 campagnes en 1993 (Annexe 3.3.), seules 6 espèces représentent plus de 50% de la biomasse totale: *Fragilaria crotonensis* (18.7%), *Ceratium hirundinella* (14.1%), *Staurastrum cingulum* (5.6%), *Peridinium willei* (5.3%), *Oscillatoria rubescens* (5.0%) et *Dinobryon bavaricum* (4.9%).

Des variations à court terme de la teneur en chlorophylle peuvent être observées. Durant le mois d'août 1993 par exemple, la teneur moyenne en chlorophylle a passé de 3.2µg/l le 12 à 2.3µg/l le 16 et à 1.3µg/l le 18 (Fig.3.16.). La profondeur du disque de Secchi a augmenté en parallèle, passant de 5.2m le 12 à 6.0m le 16 et à 7.8m le 18. Les campagnes étendues à l'ensemble du lac les 16,17 et 18 août 1993 permettent de vérifier qu'il ne s'agit pas d'un phénomène local (Fig.3.17.) et que l'érosion de la teneur en chlorophylle s'opère en 12h. En effet, aussi bien la Figure 3.16. que les profils longitudinaux de la Figure 3.17. montrent que la concentration en chlorophylle a chuté entre les mesures de la nuit du 16 au 17 août et celles de la journée du 17.

Chapitre 3: Physico-chimie, turbidimétrie,...

De telles variations entre des mesures effectuées à un jour d'intervalle ont déjà été observées, notamment sur le Léman (Blanc et al. 1993; fig.18, p.127). La cause la plus probable d'un tel phénomène est un houlage par le zooplancton, sa rapidité dans ce cas précis du mois d'août 1993 n'apparaissant pas exceptionnelle (Wetzel, 1983, p.377; Druart, comm.pers.).

Les variations spatiales de la concentration en chlorophylle-a ont pu être étudiées grâce aux profils transversaux et longitudinaux effectués. La répartition de la chlorophylle est généralement liée à la structure thermique de la masse d'eau (Figs.3.10., 3.11. et 3.12.), notamment lors d'ondes internes. Le phytoplancton n'ayant généralement pas de capacité propre de locomotion, sa répartition est dépendante de l'hydrodynamisme et les isoconcentrations en chlorophylle suivent donc plus ou moins les isothermes. Ce parallélisme entre répartition de la chlorophylle et structure thermique de la masse d'eau a été mentionné pour le Léman (Blanc et al. 1993).

D'autre part, le phénomène du réchauffement printanier plus rapide dans les zones littorales induit un développement phytoplanctonique précoce dans ces zones qui se traduit par des concentrations croissantes de chlorophylle en direction des rives (Figs.3.6. et 3.7.).

Des répartitions de la teneur en chlorophylle-a en "taches" peuvent également apparaître. Il est connu que des disparités spatiales de la production photosynthétique peuvent être dues à une modification passagère de l'intensité lumineuse. La production pouvant varier au cours de la journée, c'est également un facteur à considérer, étant donné que nos mesures sont échelonnées dans le temps.

Nous avons calculé les moyennes annuelles de concentration en chlorophylle pour plusieurs stations afin de vérifier si le choix d'une station particulière était susceptible d'être représentatif de l'ensemble du lac et si des variations spatiales significatives apparaissaient, notamment en fonction de la proximité des côtes.

Le Tableau 3.3. présente les résultats de 10 stations entre avril 1993 et juin 1994. Afin de vérifier si des tendances générales se dessinent au sein du domaine pélagique, nous avons sélectionné, en plus de la station TOSE03, trois groupes de trois stations situées à une distance réduite les unes des autres lors des campagnes ORTH, HIVE et INTE. La différence d'environ 10% rencontrée entre Haut-lac et Bas-lac peut être en grande partie expliquée par la forte variabilité de la teneur en chlorophylle régnant au printemps, elle-même fortement dépendante de la situation hydrodynamique. Il apparaît au Tableau 3.3. que les situations de Joran (vent du nord-ouest) ont tendance à accumuler le plancton en direction de la rive sud-est (stations MEBR5, HISU3, INTE11), les situations de vent d'ouest en direction de l'est et les régimes de bise vers le Haut-Lac. Il est à noter que les variations spatiales les plus élevées ont lieu lors du développement phytoplanctonique printanier. Le vent d'ouest étant le vent dominant, il est possible que les variations enregistrées au Tableau 3.3. soient caractéristiques d'une influence prépondérante du régime d'ouest, qui a tendance à accumuler le phytoplancton en direction de l'est.

L'hypothèse d'une décroissance de la productivité des zones proches des rives vers le centre du lac a également été testée. Le Tableau 3.4. présente les résultats des stations de pièges à sédiments de Chez-le-Bart (125m) et de Cortaillod (40m). La moyenne de Cortaillod environ 20% supérieure à celle de Chez-le-Bart s'explique en grande partie par le phénomène de barre thermique sensible lors de la campagne du 8 mars 94. Il semble donc qu'abstraction faite de cette situation particulière, il n'y ait en moyenne que de faibles variations de productivité dans le domaine pélagique du lac de Neuchâtel.

campagne	date	ORTH2	ORTH4	MEBR5	TOSE3	situation hydrodynamique	σ
16	14.4.93	2.24	2.631	4.746	4.376	régime SW faible	1.25
20	10.5.93	2.529	2.666	4.876	4.066	joran puis régime NE faible	1.13
24	9.6.93	1.828	1.583	1.488	1.721	régime NE faible	0.15
27	28.6.93	3.429**	3.975**	3.063**	3.283	régime NE modéré	0.39
31	30.6.93	2.195**	2.33**	3.4**	3.107	calme, onde interne	0.59
41	16.8.93	2.42**	2.142**	2.279**	2.404	calme	0.13
45	18.8.93	1.485**	1.389**	1.36**	1.343	calme	0.06
51	24.9.93	2.568	2.194	2.243	2.06	régime NE faible	0.22
55	24.11.93	1.463*	1.463*	1.264*	1.591	régime NE faible	0.14
56	19.1.94	1.2*	0.928*	0.987*	1.038	régime NE faible	0.12
58	4.3.94	1.592*	1.856*	2.28*	1.894	régime SW modéré	0.28
61	26.4.94	3.378*	4.334*	5.325*	4.299	joran modéré	0.80
63	31.5.94	4.09*	2.432*	1.667*	2.691	régime NE faible puis variable S	1.01
64	22.6.94	4.444*	4.653*	4.544*	4.563	calme	0.09
		moyenne	moyenne	moyenne	moyenne		
		2.49	2.47	2.82	2.75		

Tab.3.3. Comparaison des teneurs en chlorophylle-a des différentes parties du domaine pélagique: ORTH02, HIVE11* et INTE24**: Haut-Lac; ORTH04, HIVE09* et INTE19**: bassin nord, au large de la pointe de "La Raisse"; MEBR05, HIVE06*, INTE11**: bassin sud, à la hauteur de "La Motte"; TOSE03: bassin de Neuchâtel; les moyennes comprennent les stations 3 par 3, excepté concernant TOSE03; sigma: écart-type (N=4)

campagne	date	Pièges CLB	Pièges CO
57	31.1.94	0.959	1.088
59	8.3.94	2.205	4.852
60	20.4.94	2.117	2.756
62	24.5.94	2.561	2.456
65	6.7.94	5.261	5.501
68	10.8.94	1.409	1.514
72	20.9.94	1.204	1.887
74	18.10.94	1.271	1.149
75	7.11.94	1.732	1.794
76	24.11.94	1.781	1.693
78	19.12.94	1.1	1.128
		moyenne 1.96	moyenne 2.35

Tab.3.4. Comparaison des teneurs en chlorophylle-a (couche 0-10m, µg/l) entre les stations des pièges de Chez-le-Bart et de Cortaillod; Année 1994

Les recommandations qui peuvent être faites au niveau du suivi de l'état sanitaire du lac sont les suivantes:

- écourter les intervalles entre les campagnes de manière générale et en particulier lors du développement phytoplanctonique printanier afin de bien identifier les pics de production aussi bien temporellement que quantitativement;
- procéder à des mesures sur plusieurs stations afin de tenter de s'affranchir des phénomènes hydrodynamiques ou, dans cette impossibilité, choisir une station proche du centre du lac.

3.4. Teneur en oxygène dissous

Quelques profils caractéristiques sont présentés à la Figure 3.18. Durant la période d'homothermie, la teneur en oxygène dissous se stabilise vers 12mg/l, soit à proximité de la saturation. Les déviations majeures par rapport à cette valeur s'observent avant tout lors du développement phytoplanctonique printanier avec des valeurs épilimniques élevées dues à l'intense activité photosynthétique (27.4.93) ainsi que durant l'été avec des valeurs chutant vers 8-9mg/l à proximité du fond et dans le métalimnion, ce qui est dû à la demande en oxygène pour la minéralisation de la matière organique.

3.5. pH

Le pH d'un lac tel que celui de Neuchâtel, où l'essentiel des ions en solution est constitué de carbonates et de bicarbonates, est avant tout régulé par l'activité photosynthétique, la respiration et la minéralisation de la matière organique.

L'activité photosynthétique, en consommant le CO₂, va déplacer l'équilibre suivant vers la droite et donc provoquer une augmentation du pH:



Le contraire est évidemment valable pour la respiration et les réactions de minéralisation de la matière organique. L'évolution annuelle du pH (Fig.3.19.) est donc caractérisée par une augmentation progressive des valeurs épilimniques durant la période stratifiée (8.5-8.6 de mai à novembre) et par des diminutions métalimnique et hypolimnique de fond concomitantes, principalement dues à la minéralisation de la matière organique.

3.6. Conductivité électrique

La conductivité électrique est une mesure de la concentration en sels dissous. Les mesures sont normalisées à une température de 25°C. Les bicarbonates et le calcium étant les ions les plus abondants dans le lac de Neuchâtel, la variation de la conductivité électrique traduit en grande partie les phénomènes de précipitation et de dissolution de la calcite endogénique. La minéralisation de la matière organique est également susceptible d'y contribuer pour une part.

L'évolution saisonnière de la conductivité (Fig.3.20.) se marque par une diminution épilimnique progressive qui atteint son amplitude maximale en août-septembre, passant de 310-320µS/cm à environ 270-280µS/cm. Une légère augmentation estivale de la conductivité s'observe à la base de l'hypolimnion (5-10µS/cm). Son origine peut être reliée à deux processus: (i) dissolution partielle de la calcite endogénique et (ii) minéralisation de la matière organique. La proportion de calcite endogénique redissoute est toutefois probablement faible, les teneurs

en calcium dissous de la couche hypolimnique de fond n'étant pas significativement supérieures à la moyenne de l'hypolimnion (Fig.3.22.) (cf. également paragraphes 3.7. et 4.4.4.).

Le début de la diminution épilimnique saisonnière de la conductivité peut être considéré comme un bon indicateur du commencement de la précipitation de calcite endogénique (Figs.3.20. et 3.21.). En 1993 et 1994, la conductivité épilimnique a commencé à diminuer fin avril ou début mai. Jusqu'à fin juin, la diminution a été toutefois plus forte en 1993 qu'en 1994. Les minimas de conductivité se situent en août-septembre.

La conductivité hypolimnique a augmenté d'environ 15µS/cm entre 1992 et 1994 (Figs.3.20. et 4.22.). Une interprétation possible est que la quantité de calcite endogénique précipitée soit en diminution depuis le début de la réoligotrophisation du lac, ce qui semble partiellement confirmé par la légère augmentation de la teneur en calcium (Figs.3.22. et 4.22.). Une dérive des capteurs n'est toutefois pas impossible, bien que l'augmentation parallèle de la teneur en calcium (Fig.4.22.) rende cette hypothèse improbable. Malheureusement, de par l'absence de calibration du capteur de conductivité, il n'est pas possible de l'exclure. Toute comparaison avec des publications antérieures, par exemple celles de Bapst (1987) ou de Sollberger (1974) est malaisée, étant donné que ces auteurs ont utilisé des appareillages différents.

A noter que notre étude n'a pas confirmé l'existence des variations spatiales de conductivité observées par Bapst (1987).

3.7. Chimie de l'eau

Teneurs en calcium, magnésium, chlorures et sulfates

L'évolution de la teneur en calcium est présentée à la Figure 3.22. Elle est dans les grandes lignes parallèle à celle de la conductivité. L'absence d'augmentation de la teneur en Ca^{2+} à proximité du fond confirme que la dissolution de calcite endogénique est quantitativement pratiquement négligeable. La teneur en magnésium dissous est restée constante et voisine de 6mg/l tout au long de la période d'étude (Annexe 3.4.). Aucune diminution épilimnique estivale n'est observée. En postulant que le magnésium substitue le calcium à hauteur d'au maximum 3% dans la calcite endogénique, la diminution épilimnique estivale devrait rester inférieure à 0.2mg/l, ce qui se situe dans la fourchette d'imprécision de la méthode.

Teneurs en silice et en nitrates

- **Silice** (Fig.3.23.): d'une concentration légèrement inférieure à 2mg/l et constante en fonction de la profondeur pendant la période d'homothermie, la teneur épilimnique en silice dissoute diminue jusqu'à des valeurs inférieures à 0.5mg/l au cours du printemps, teneur généralement considérée comme limitante pour le développement des diatomées (Weitzel 1983, p.337). Conjointement à la diminution épilimnique, les teneurs hypolimniques augmentent et atteignent 2.5-3mg/l en été. La cause de cette augmentation peut être attribuée à une dissolution partielle des frustules, éventuellement accélérée par leur consommation et leur fragmentation par le zooplancton (Weitzel 1983, p.335), ainsi qu'à la libération de silice depuis le sédiment (Weitzel 1983, p.334).

- **Nitrates**: la teneur en nitrates avoisine 5mg/l, la diminution épilimnique estivale étant de l'ordre de 1.5mg/l (Fig.3.24.). L'augmentation d'environ 20% observée entre 1992 et 1994 n'est que partiellement confirmée par les analyses du SCPE, selon lesquelles cette augmentation n'atteint qu'environ 10% (Fig.3.2.A.).

3.8. Turbidimétrie

La turbidité a été mesurée à l'aide de deux appareils distincts; un rétrodiffusiomètre Dr.Haardt (backscattering) et un diffusiomètre Züllig (diffusion vers l'avant ou forward scattering). Ces deux appareils ont des sensibilités différentes, de par leur principe de mesure; mesure du rapport entre lumière diffusée vers les petits angles (entre 0 et 5 degrés par rapport à une ligne droite vers l'avant) et lumière transmise dans le cas du diffusiomètre Züllig, et mesure de la proportion de lumière émise qui est diffusée vers les grands angles (entre 175 et 180 degrés) dans le cas du rétrodiffusiomètre Dr.Haardt.

La diffusion de la lumière par les particules est influencée par plusieurs facteurs, dont la nature des particules (indice de réfraction) et leur taille. L'augmentation de la taille des particules favorise la diffusion dans la direction des petits angles, alors que l'augmentation de l'indice de réfraction favorise la diffusion dans la direction des angles proches de 180°.

3.8.1. Individualisation des couches néphéloïdes

Les caractéristiques des différentes couches néphéloïdes observées au cours de la période stratifiée sont illustrées à la Figure 3.25. (station ORTH06, campagne du 3 août 1992). La colonne d'eau peut être subdivisée en 5 couches de turbidité caractéristique:

Couche 1: L'épilimnion est caractérisé par une turbidité ainsi qu'une rétrodiffusion élevées;

Les deux mesures de la turbidité diminuent fortement dans le métalimnion; **Couche 2**

L'hypolimnion peut être subdivisé en trois couches néphéloïdes distinctes:

- **Couche 3;** une couche d'eau claire, encore appelée *Clear Water Layer (CWL)* (Bapst & Kübler 1987), où turbidité et rétrodiffusion sont minimales
- **Couche 4;** une couche néphéloïde benthique ou *Benthic Nepheloid Layer (BNL)*, qui se développe au-delà d'une profondeur de 100-110m et où turbidité et rétrodiffusion sont plus élevées que dans la couche hypolimnionique sus-jacente.
- **Couche 5;** une couche néphéloïde de fond limitée à quelques mètres au-dessus de l'interface avec le sédiment, où la rétrodiffusion augmente de manière significative.

La relation entre turbidité et rétrodiffusion diffère sensiblement selon la couche considérée. La comparaison des deux mesures permet de préciser les caractéristiques optiques des différentes couches néphéloïdes:

- **épilimnion:** la rétrodiffusion n'est que peu sensible à l'augmentation de la turbidité (Fig.3.26.B).
- **métalimnion et hypolimnion,** couche néphéloïde de fond exceptée, ont des caractéristiques identiques quant à la relation rétrodiffusion versus turbidité, la pente de la droite $y=ax+b$ (y : rétrodiffusion; x : turbidité) étant généralement comprise entre 0.025 et 0.04 (Fig.3.26. C) et D).
- **couche néphéloïde de fond:** la rétrodiffusion varie fortement au sein de cette couche, alors que la turbidité reste pratiquement constante (Fig.3.26.E). Cette évolution particulière concerne une couche d'épaisseur variable, de 5-7m au maximum.

Durant la période d'homogénéité thermique hivernale, la relation rétrodiffusion versus turbidité est proche de celle observée en été pour les couches méta- et hypolimnioniques (Fig.3.26.F).

D'autres couches aux caractéristiques optiques particulières peuvent également être différenciées. La Figure 3.27. présente deux situations où la variation de la rétrodiffusion en fonction de la turbidité est forte à la base de l'épilimnion. Cela correspond également à une forte variation de la rétrodiffusion par rapport à celle de la chlorophylle-a (Fig.3.27.C), alors que ces deux mesures sont généralement indépendantes dans la couche épilimnionique (Fig.3.27.D). Des comptages de phytoplancton ont indiqué que cette situation correspondait à la présence d'abondantes cyanobactéries, *Oscillatoria limnetica* et *Oscillatoria rubescens* notamment.

Le cas des couches de cyanobactéries excepté, la rétrodiffusion évolue généralement de manière indépendante par rapport à la teneur en chlorophylle. Il n'en est pas de même en ce qui concerne la turbidité, qui est fortement corrélée à la teneur en chlorophylle dans l'épilimnion (Fig.3.27.E).

3.8.2. Relations entre les mesures de la turbidité et la charge totale de matière en suspension

Relation entre turbidité et charge totale

Bapst (1987) a défini la relation suivante entre la mesure du turbidimètre Züllig et la charge totale de matière en suspension (MES) dans le lac de Neuchâtel:

$$y = 1.7 \times x \quad (3-4)$$

où: - y : charge en suspension (mg/l); - x : turbidité (FTU)

Hofmann & Dominik (1995) montrent bien qu'établir une telle relation n'est possible qu'en considérant séparément les zones où la matière en suspension possède des signatures optiques propres et que la relation établie n'est valable que pour un laps de temps au cours duquel aucun changement majeur de composition de la matière en suspension n'intervient.

Au cours de notre étude, environ 200 mesures de la charge de matière en suspension ont été effectuées (Annexe 3.5.). Les résultats sont présentés en Figure 3.28. La disparité des réponses est énorme (Fig.3.28.A). Cependant, si l'on ne considère que les mesures de la période faiblement à non stratifiée (octobre-mars), la corrélation entre turbidité et MES est relativement bonne (Fig.3.28.B: $r^2=0.75$, $N=73$).

La relation entre charge totale et turbidité s'établit en ce qui concerne la période non stratifiée à:

$$y = 0.88 \times x + 0.22 \quad r^2 = 0.75 \quad (3-5)$$

où: - y : charge en suspension (mg/l); - x : turbidité (FTU)

La valeur élevée de la charge en suspension (0.22mg/l) à turbidité nulle (facteur b de l'équation 3-5) pose des problèmes d'interprétation. Comme le propose Hofmann (1996), confrontée à un cas semblable, la fraction colloïdale ($<1\mu m$) des particules en suspension peut être responsable de cette particularité. La sensibilité du turbidimètre Züllig est faible vis à vis des particules de cette taille, alors que celles-ci sont probablement en grande partie retenues par les filtres de $0.45\mu m$ de porosité, qui sont rapidement colmatés.

La corrélation entre turbidité et charge totale est mauvaise en ce qui concerne la période stratifiée (avril-septembre)(Fig.3.28.C, D) et E) et aucune relation telle que celle avancée pour la période non stratifiée (équation 3-5) ne peut être proposée. A charge égale, les valeurs de turbidité de la couche épilimnionique (0-25m) sont

supérieures à celles de la couche hypolimnionique (25m-fond)(Fig.3.28.C, D) et E). D'autre part, les valeurs épilimniques de l'été 1992 sont également supérieures à celles des étés 1993 et 94.

Relation entre rétrodiffusion et charge totale

De manière similaire à la turbidité, l'évolution de la rétrodiffusion est indépendante de la charge totale lors de la période estivale (Fig.3.29.B). Contrairement à ce qui s'observe dans le cas de la turbidité, la rétrodiffusion est généralement plus élevée en hiver que durant la période stratifiée (Fig.3.29.A), ce qui peut être mis en relation avec la plus grande proportion de particules minérales qui diffusent fortement en direction des grands angles. Une relativement bonne corrélation est obtenue pour la période octobre 94 à mars 95 entre rétrodiffusion et charge totale (Fig.3.29.C). La corrélation entre rétrodiffusion et turbidité est également bonne pour cette même période (Fig.3.29.D). Ceci indique que la rétrodiffusion peut être considérée, au même titre que la turbidité, comme estimation semi-quantitative de la charge totale durant la période hivernale non stratifiée.

Discussion

Les réponses des deux appareils de mesure peuvent être interprétées de la manière suivante:

- dans l'épilimnion, les particules organiques vivantes ou mortes diffusent de manière prépondérante vers les petits angles, de par leur relativement grande taille et leur indice de réfraction faible. Ceci expliquerait la forte variabilité de la turbidité et au contraire la faible variabilité de la rétrodiffusion dans l'épilimnion estival. La bonne corrélation entre turbidité et teneur en chlorophylle-a confirme cette hypothèse.
- une grande proportion de particules minérales conduisant à une diffusion en direction des grands angles pourrait expliquer la sensibilité du rétrodiffusiomètre dans l'hypolimnion. La même explication peut être avancée en ce qui concerne la période hivernale.
- la forte sensibilité du rétrodiffusiomètre dans la couche néphéloïde de fond est attribuable à la présence de particules de petite taille d'origine essentiellement minérale. Il pourrait s'agir d'une couche de type "benthic boundary layer" (BBL), c'est-à-dire d'une couche de mélange où le sédiment est remis en suspension par la turbulence. Gloor et al. (1993) ont observé l'existence d'une BBL de 2 à 7m d'épaisseur dans l'Alpnachersee (Lac des Quatre Cantons) caractérisée par des gradients de température d'au moins un ordre de grandeur inférieurs à la couche d'eau immédiatement supérieure. La concentration en particules était de 2 à 4 fois plus élevée par rapport à la couche supérieure et 90% de ces particules avaient une taille inférieure à 0.8µm. Dans le lac de Neuchâtel, la relativement faible sensibilité du diffusiomètre Züllig dans la couche néphéloïde de fond pourrait également être due à la présence de particules de taille inférieure à 1µm. En effet, si la diffusion est essentiellement dirigée vers l'avant pour les particules de taille supérieure à 1µm, elle se rapproche de l'isotropie au-dessous de cette taille (Allen 1990), et les particules diffusent dans ce cas dans toutes les directions. Une forte proportion de particules de petite taille dans l'hypolimnion estival pourrait alors être à l'origine de la très faible turbidité hypolimnionique observée en regard des charges en suspension non négligeables qui sont enregistrées, explication qui rejoint celle formulée concernant l'équation 3-5. Les données de la granulométrie du matériel récolté dans les pièges à sédiments confirment que les particules présentes dans les couches néphéloïdes de fond sont en moyenne de taille inférieure par rapport aux particules en suspension dans le reste de la colonne d'eau. Il faut en outre tenir compte du fait que les pièges à sédiments intègrent les particules qui sédimentent de manière active, et ne peuvent représenter une image instantanée des particules en suspension, une certaine partie d'entre elles étant maintenues durant un relativement long laps de temps en suspension.

La disparité des valeurs épilimniques estivales du turbidimètre Züllig par rapport à l'évolution de la charge totale peut s'expliquer par la succession temporelle de particules aux caractéristiques optiques différentes, que ce soit la succession des espèces planctoniques (tailles différentes) ou la modification des proportions respectives de calcite endogénique et de matière organique. La teneur en matière organique semble en effet influencer fortement l'atténuation de la lumière (Mudroch & Mudroch 1992).

La bonne corrélation observée durant la période non stratifiée entre turbidité et charge en suspension est aisément compréhensible: la colonne d'eau étant homogénéisée, la qualité des particules en suspension ne varie que peu en fonction de la profondeur, ce qui est également confirmé par les relations rétrodiffusion versus turbidité et rétrodiffusion versus charge totale (Fig.3.29.D) et C).

Le fait que la rétrodiffusion soit très peu sensible à la variation de la charge totale dans l'épilimnion estival s'explique par la faible diffusion en direction des grands angles de la part des particules organiques vivantes.

3.8.3. Variabilité spatio-temporelle de la turbidité

L'évolution saisonnière de la turbidité peut être résumée de la façon suivante: au cours de la période d'homothermie, la turbidité est plus ou moins constante sur toute la colonne d'eau avec des valeurs situées entre 0.5 et 1FTU (Fig.3.30.). Au printemps, épilimnion et hypolimnion suivent une évolution opposée: la turbidité épilimnionique augmente et reste élevée tout au long de la période stratifiée (1 à 3FTU) alors que la turbidité hypolimnionique diminue progressivement pour atteindre des valeurs de l'ordre de 0.1FTU. La rapidité de cette diminution - environ un mois pour passer de près de 1FTU à 0.2FTU (Fig.3.31.) - est indicative d'une vitesse de chute des particules relativement élevée en/ou de l'aggrégation des particules fines.

La turbidité et l'épaisseur de la couche benthique néphéloïde restent relativement constantes au cours de la saison estivale, ce qui indique qu'un état proche de l'état stationnaire est atteint.

Le parallélisme entre l'évolution de la turbidité épilimnique et les phases de développement phytoplanctonique apparaît clairement. De même, la phase d'eaux claires de fin mai - début juin est marquée par des valeurs minimales.

En hiver, la variation spatiale de la turbidité dépend, comme nous allons le voir au chapitre suivant, de l'intensité de la resuspension. En été, la répartition spatiale de la turbidité épilimnique est fonction de celle de la chlorophylle. Dans l'hypolimnion, la turbidité reste généralement inférieure à 0.2FTU, la couche néphéloïde benthique exceptée. Cependant, des panaches particuliers apparaissent parfois au niveau des stations ORTH04 et HINO03 (=HIVE09), et s'étendent dans certains cas jusqu'aux stations ORTH03 et ORTH05 ainsi que HINO02 (=HIVE11) (Fig.3.32.) (cf. Annexe 3.2. pour la localisation des stations). Ces panaches peuvent apparaître au sommet (Fig.3.32.B), au sein (Fig.3.32.A) ou à la base (Fig.3.32. C) et D) de l'hypolimnion.

Après vérification (campagne 37. "la Raisse"), il s'est avéré que ces couches turbides étaient la conséquence d'activités humaines (dragage du plateau lacustre au large de la Raisse notamment, à proximité de la station INTE19, Annexe 3.2.).

3.9. Conclusions

Le suivi de l'évolution spatio-temporelle de la température et de la productivité par l'entremise de la mesure de la concentration en chlorophylle a permis de mettre en évidence les phénomènes suivants:

- au premier printemps une barre thermique peut se former, et se traduit par une température des eaux littorales plus élevée que celle au centre du lac. Ce phénomène a une influence sur le développement phytoplanctonique, la teneur en chlorophylle-a pouvant atteindre dans les zones littorales plusieurs fois sa valeur au centre du lac.
- la répartition spatiale de la chlorophylle est en partie déterminée par la situation hydrodynamique, le plancton ayant tendance s'accumuler dans les zones du lac situées sous le vent. Les ondes internes ont également une incidence non négligeable, le rapport des teneurs en chlorophylle entre deux stations situées aux deux extrémités du lac lors d'une onde pouvant s'élever à 2.5.
- les moyennes annuelles de la concentration en chlorophylle varient peu au sein du domaine pélagique. Une accumulation légèrement préférentielle du plancton dans la partie est du lac peut être postulée et serait due à l'influence d'un régime préférentiel de circulation déterminé par le vent dominant d'ouest. D'autre part, la variabilité spatiale de la concentration en chlorophylle est de manière générale plus élevée durant les fortes productions du printemps que durant le reste de l'année.
- l'évolution de la concentration en chlorophylle montre une légère diminution entre 1992 et 1994, qui est couplée à un approfondissement de la localisation du phytoplancton. Ce phénomène mériterait d'être suivi à plus long terme pour être vérifié. Une succession rapide de phases d'eaux claires et de développements phytoplanctoniques a été enregistrée en 1993. De plus, des diminutions de l'ordre de 50% de la concentration en chlorophylle en l'espace de quelques heures ont été observées, leur cause probable étant un broutage rapide par le zooplancton.

La mesure de la conductivité électrique et l'analyse de la concentration en calcium dissous se révèlent être un bon moyen en vue de suivre les phases de précipitation de la calcite endogénique.

L'utilisation de deux diffusionmètres (forward- et backscattering) permet de différencier des couches néphéloïdes aux caractéristiques optiques propres. La turbidité et la rétrodiffusion sont des mesures semi-quantitatives de la charge totale en période non stratifiée, l'homogénéité optique de la colonne d'eau étant probablement réalisée durant cette période. L'absence de corrélation entre turbidité et charge totale durant la période stratifiée peut s'expliquer par une forte variabilité de la nature des particules.

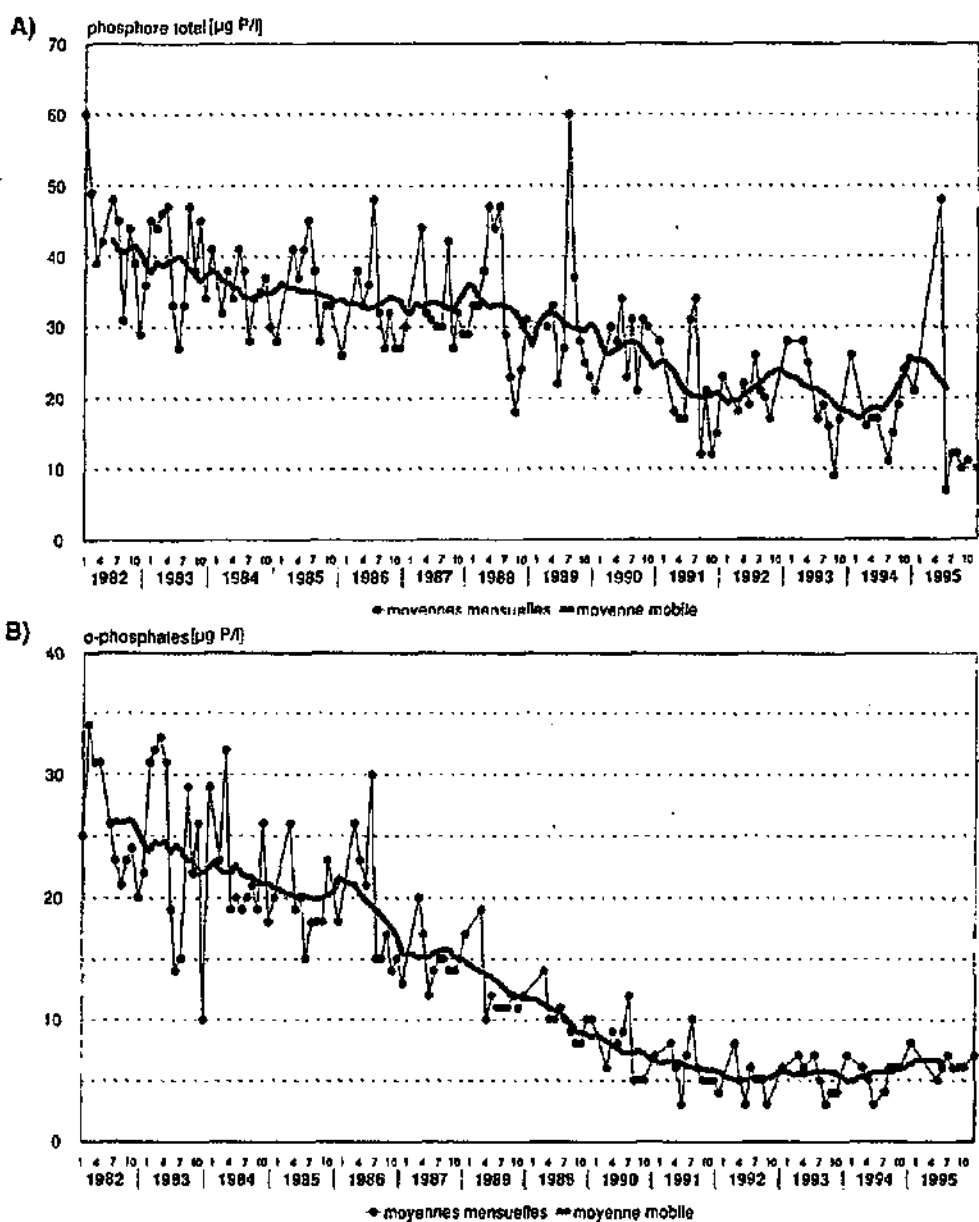


Fig.3.1. A) Evolution de la teneur des eaux du Lac de Neuchâtel en phosphore total de 1982 à 1995
 B) Evolution de la teneur moyenne en orthophosphates de 1982 à 1995; station de Treytel (Bavaix, 153m).
 Source: Service Cantonal neuchâtelois de la Protection de l'Environnement, non publié.

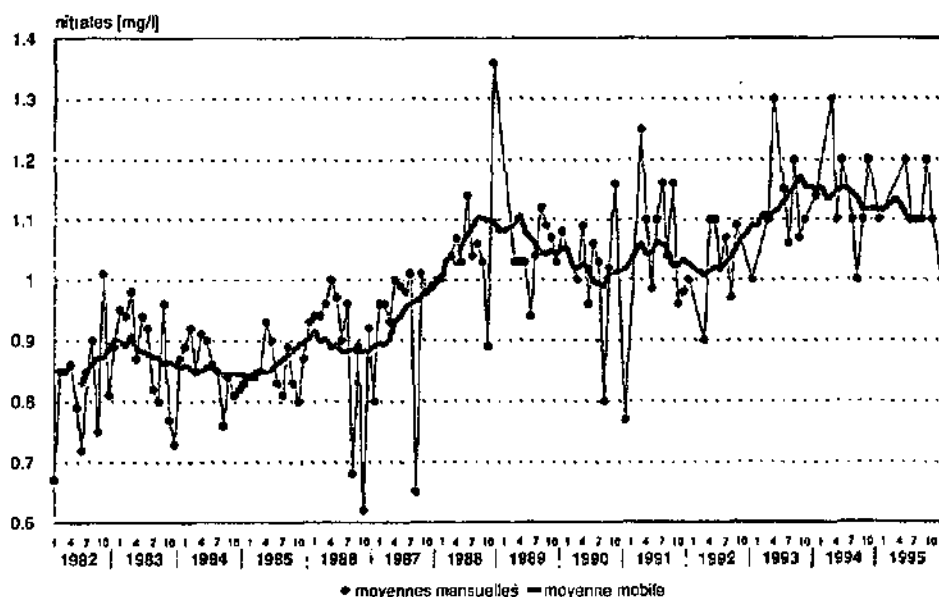


Fig.3.2. Evolution de la teneur moyenne des eaux du Lac de Neuchâtel en nitrates de 1982 à 1995.
 Source: Service Cantonal neuchâtelois de la Protection de l'Environnement (SCPE); station de Treytel (153m).

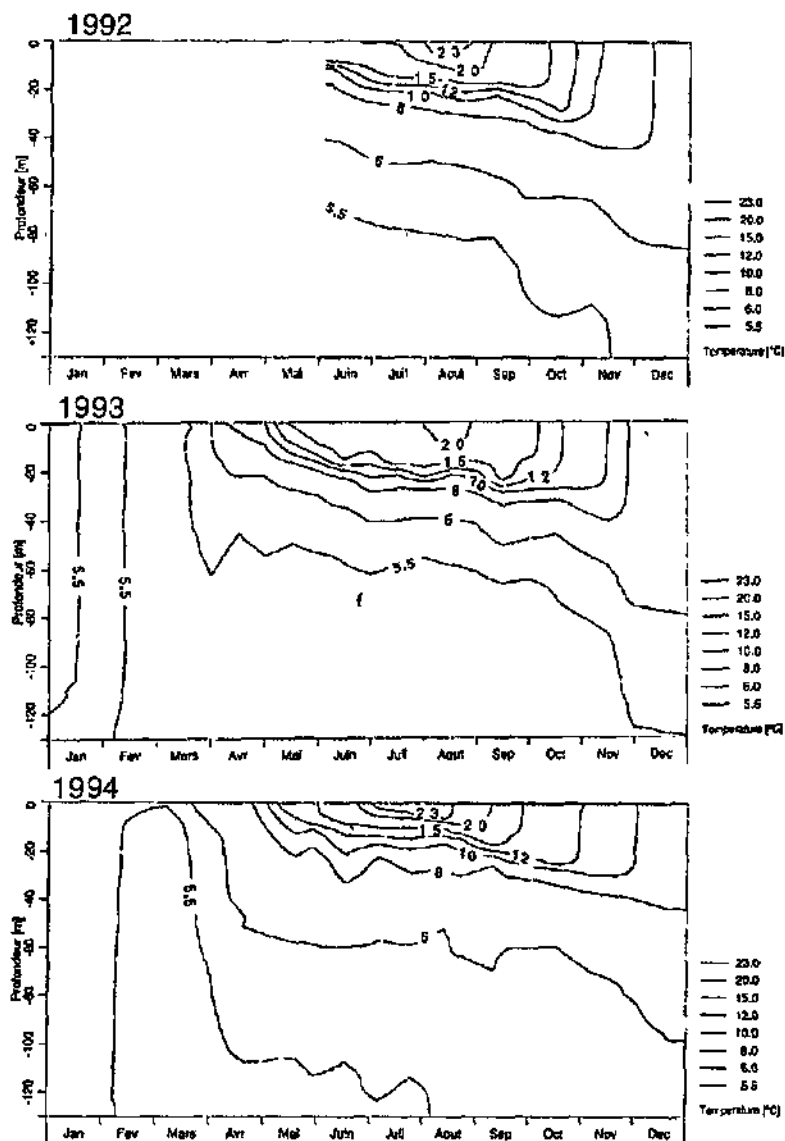


Fig.3.4. Evolution de la température du lac de Neuchâtel de juin 1992 à décembre 1994 à la station TOSE03

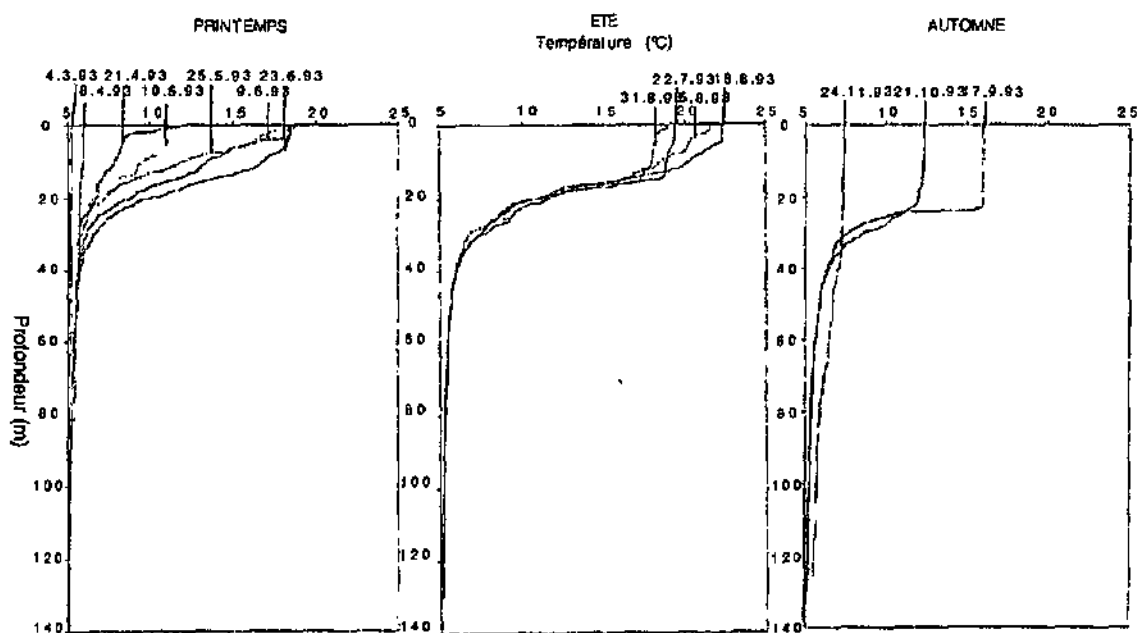


Fig.3.5. Evolution des profils de température au cours de l'année 1993; remarquez que la légère augmentation de la température entre le 4.3.93 et le 8.4.93 se fait sentir jusqu'à plus de 40m de profondeur; notez également les importantes couches de mélange qui se forment dès le mois de septembre

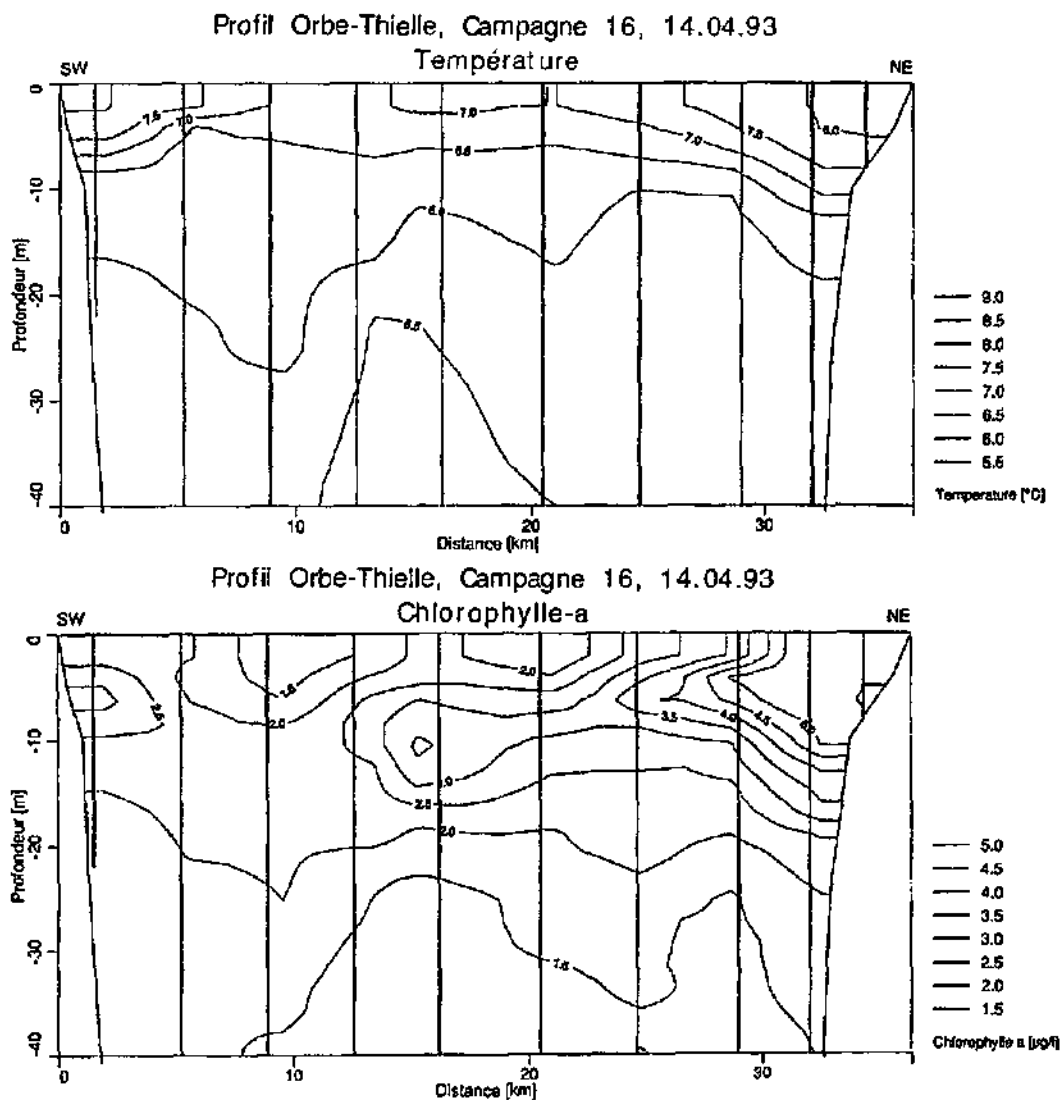


Fig.3.6. Température et teneur en chlorophylle-a sur un profil Orbe-Thielle, le 14 avril 1993; le réchauffement printanier plus rapide à proximité des rives se traduit par une production phytoplanctonique localement plus importante

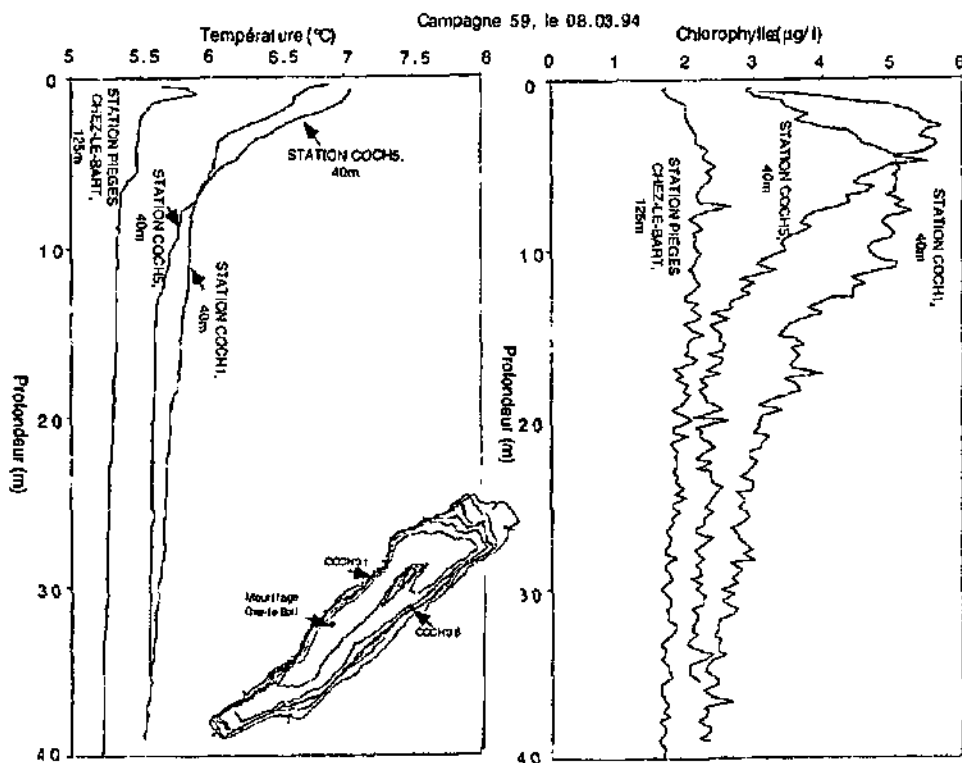


Fig.3.7. Température et teneur en chlorophylle-a aux stations COCH01 et 05, ainsi qu'à la station de pièges à sédiments de Chez-le-Bart, le 8 mars 1994; les commentaires de la figure précédente s'appliquent

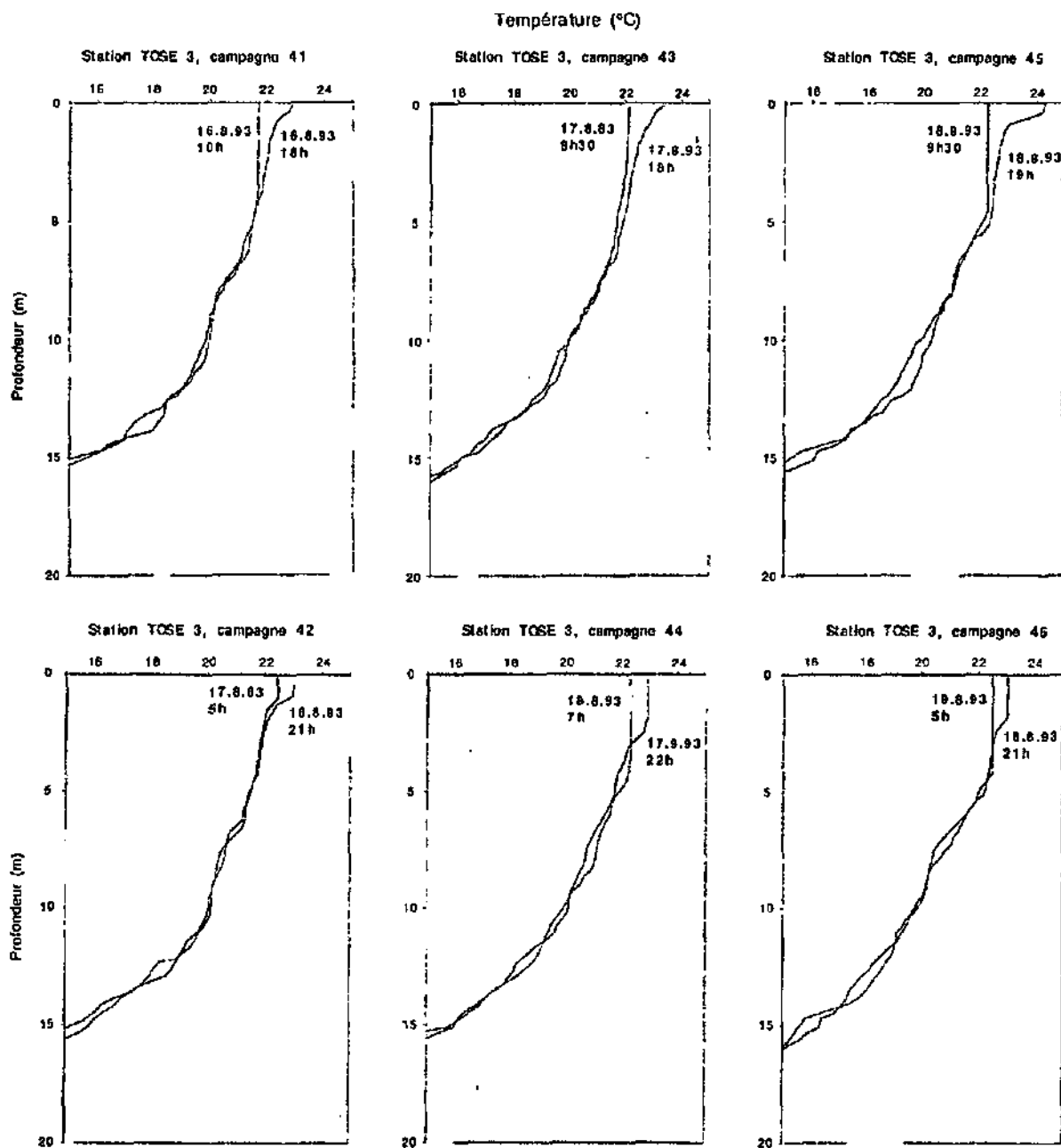
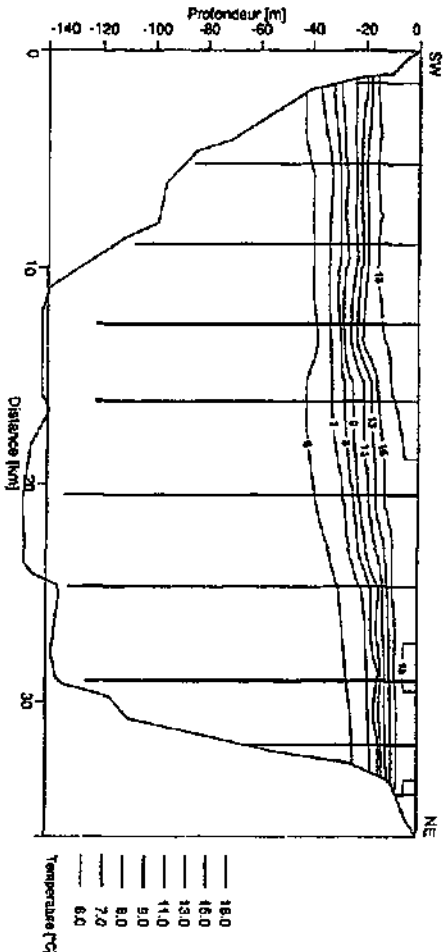


Fig.3.8. Evolution nyctémérale de la température épilimnique lors de trois journées d'été (16-18 août 1993, station TOSE03).

Profil: Orbe-Thielle, Sortie: 29, Date: 290693
Temperature



Profil: Orbe-Thielle, Sortie: 31, Date: 300693
Temperature

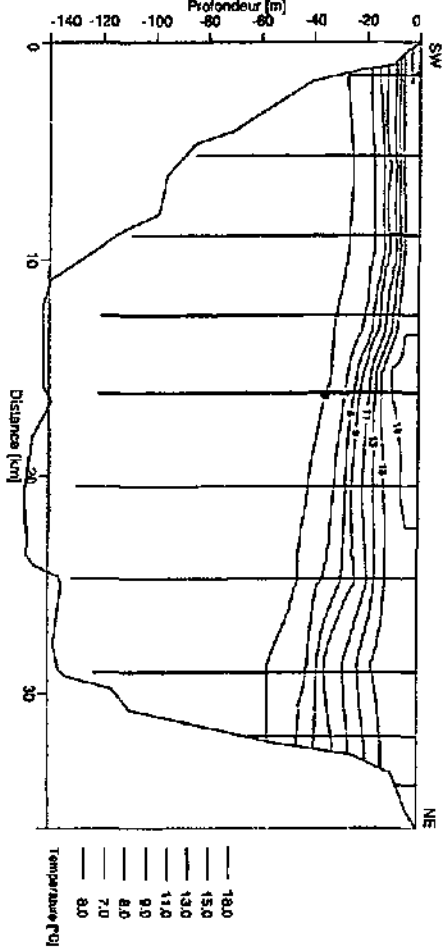
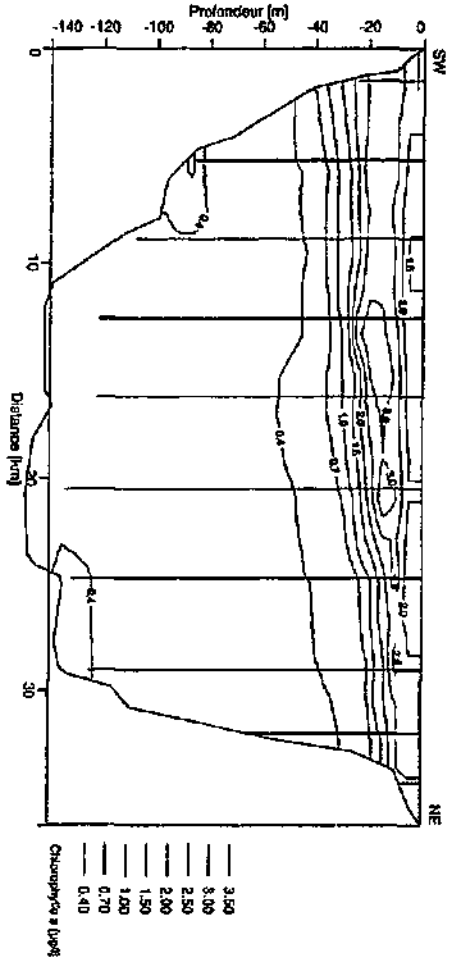


Fig.3.9. Température sur le profil longitudinal "Orbe-Thielle", les 29 et 30 juin 1993

Profil: Orbe-Thielle, Sortie: 29, Date: 290693
Chlorophyll a



Profil: Orbe-Thielle, Sortie: 31, Date: 300693
Chlorophyll a

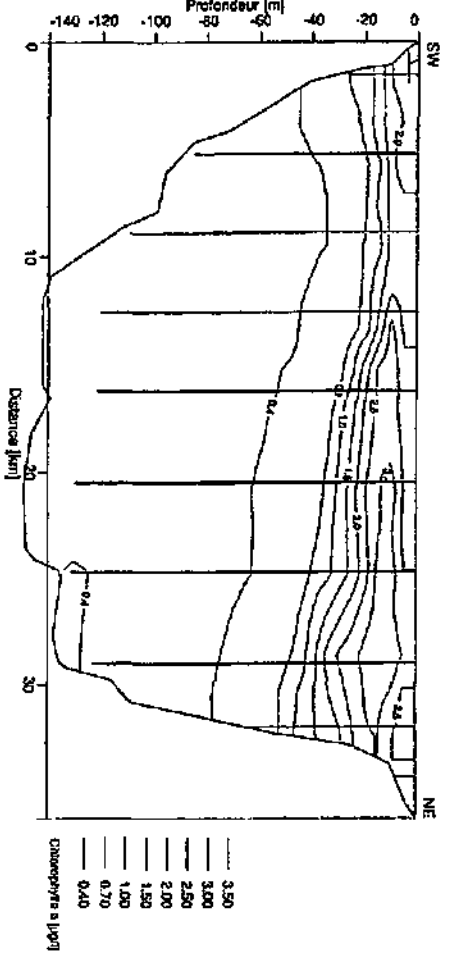
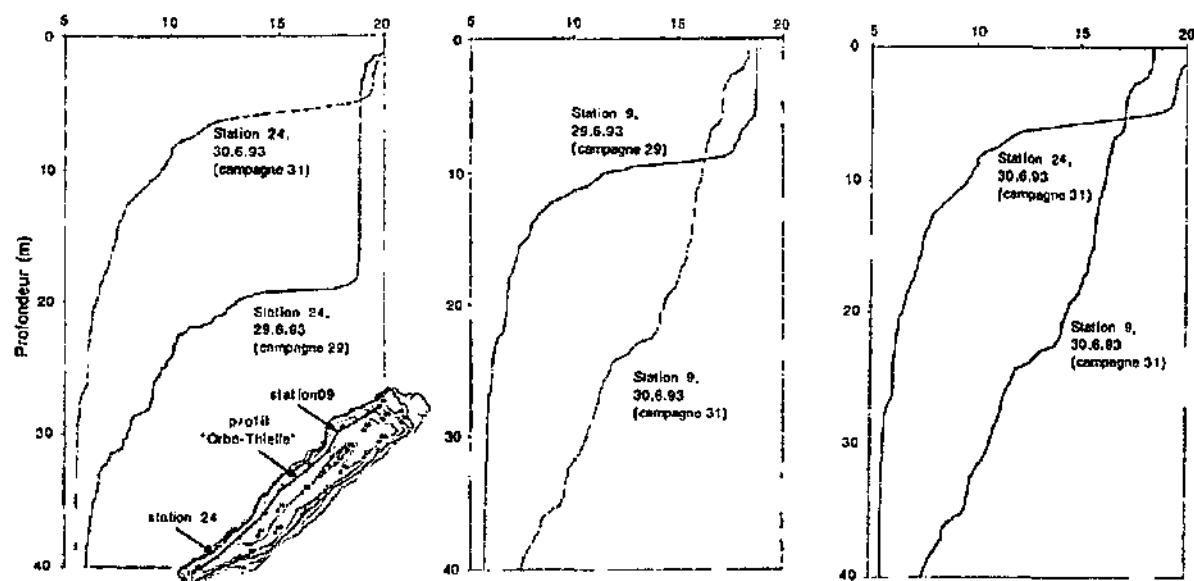
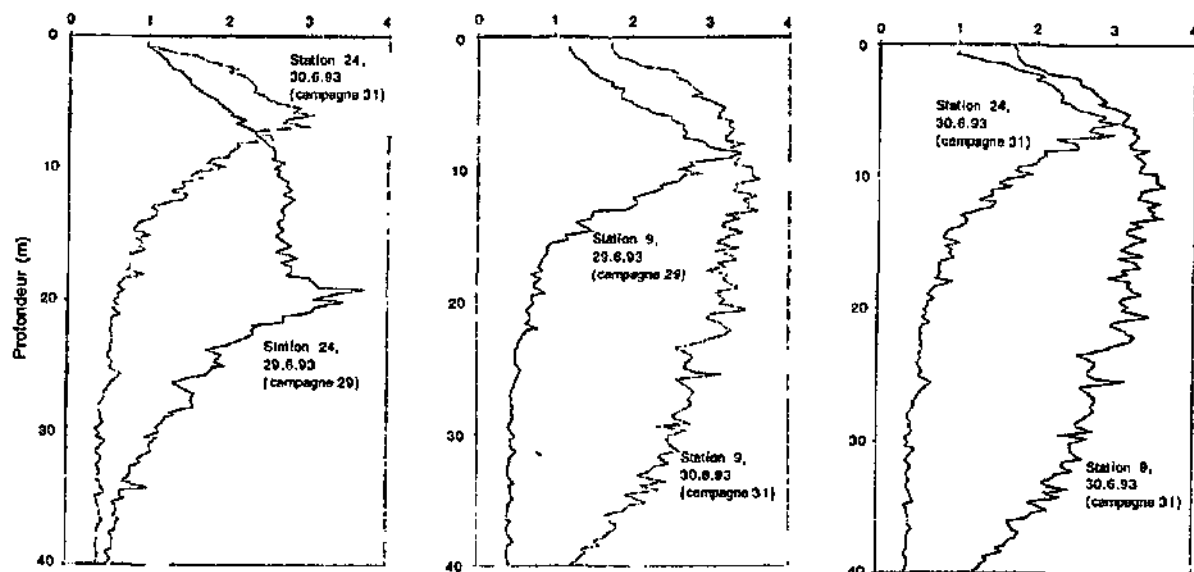


Fig.3.10. Répartition spatiale de la chlorophylla sur le profil "Orbe-Thielle" lors de l'onde interne enregistrée les 29 et 30 juin 1993

Température (°C)



Chlorophyll a ($\mu\text{g/l}$)



Rapport de concentration en chlorophyll-a des deux stations pour la couche 0-30m:

29024/31024: 1.80

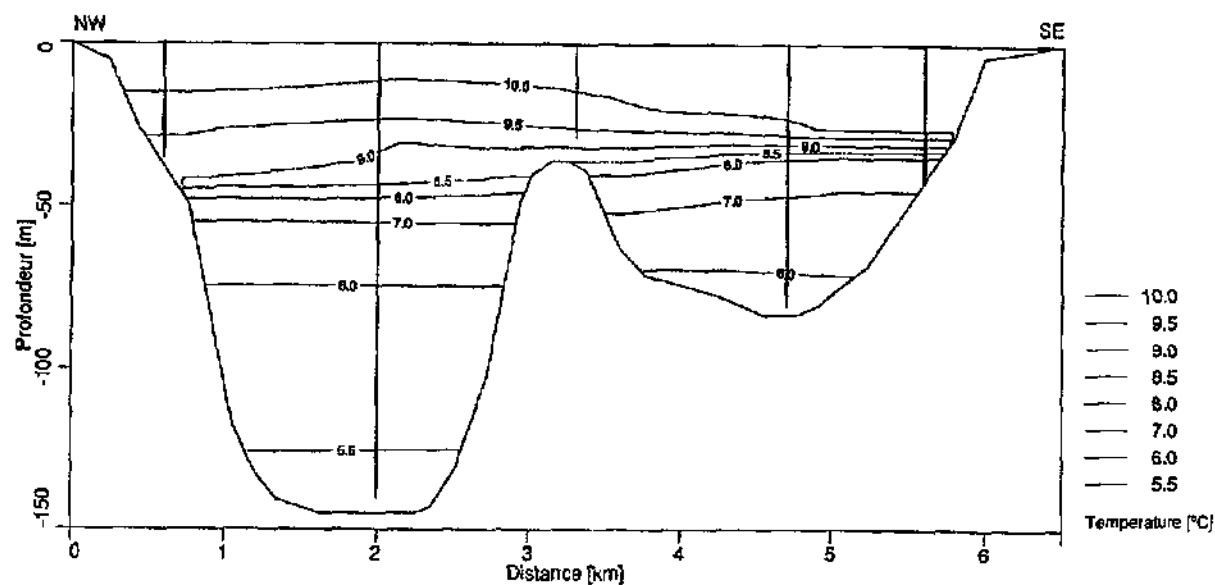
29009/31009: 2.17

31009/31024: 2.43

Fig.3.11. Comparaison des profils de température et de teneur en chlorophyll a lors de l'onde interne des 29 et 30 juin 1993; - colonnes de gauche et du centre: deux mesures sur la même station à un jour d'intervalle; - à droite: deux stations situées aux extrémités du lac lors de la campagne du 30 juin; chaque comparaison fait état de profils de température et de production totalement différents, ce qui est dû à des transferts de matière (et donc de plancton) aussi bien verticaux qu'horizontaux au cours du développement de l'onde interne (cf. texte)

Profil: Cortailod-Chevroux, Sortie: 11, Date: 051192

Temperature



Profil: Cortailod-Chevroux, Sortie: 25, Date: 150693

Temperature

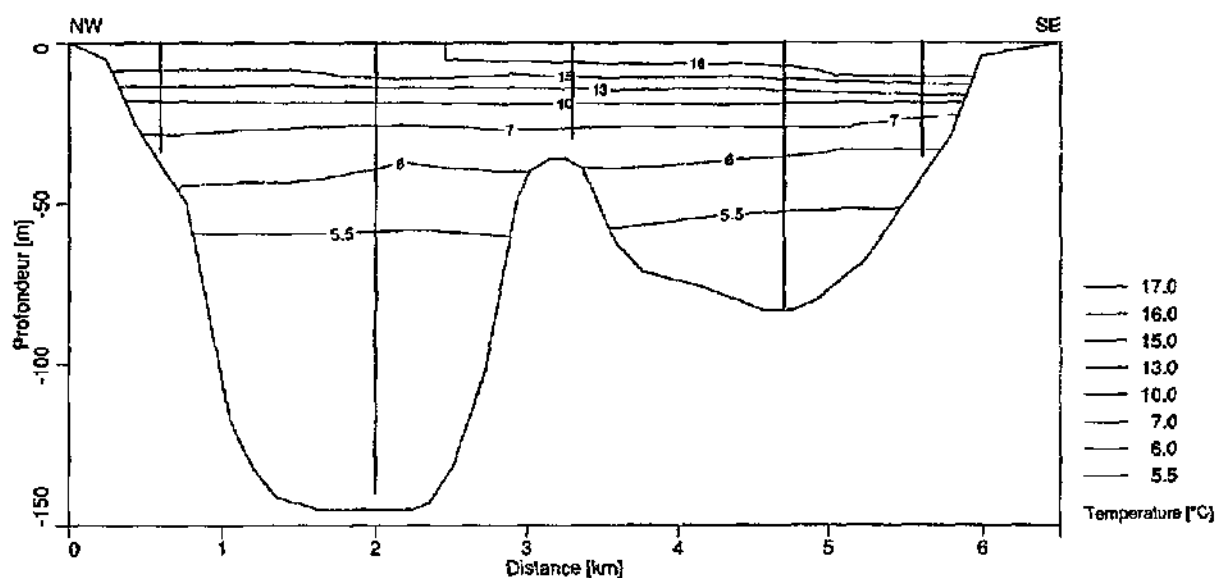


Fig.3.12. Empreinte probable d'une circulation en double-cellule, se marquant par la divergence des isothermes du côté NW et leur convergence du côté SE, lors des campagnes du 5 novembre 1992 et du 15 juin 1993

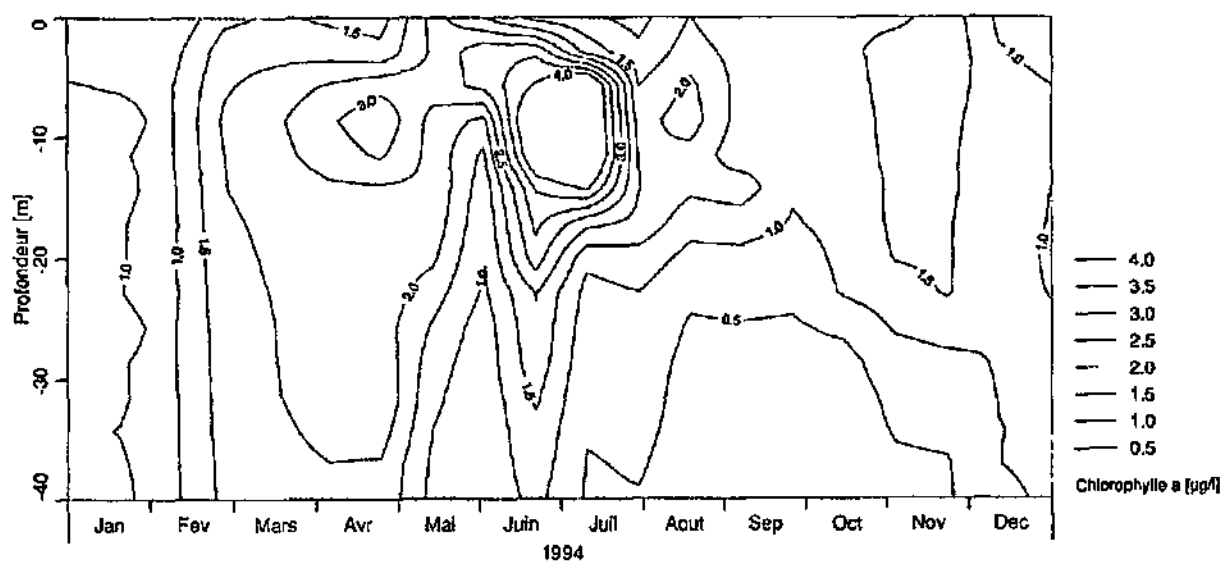
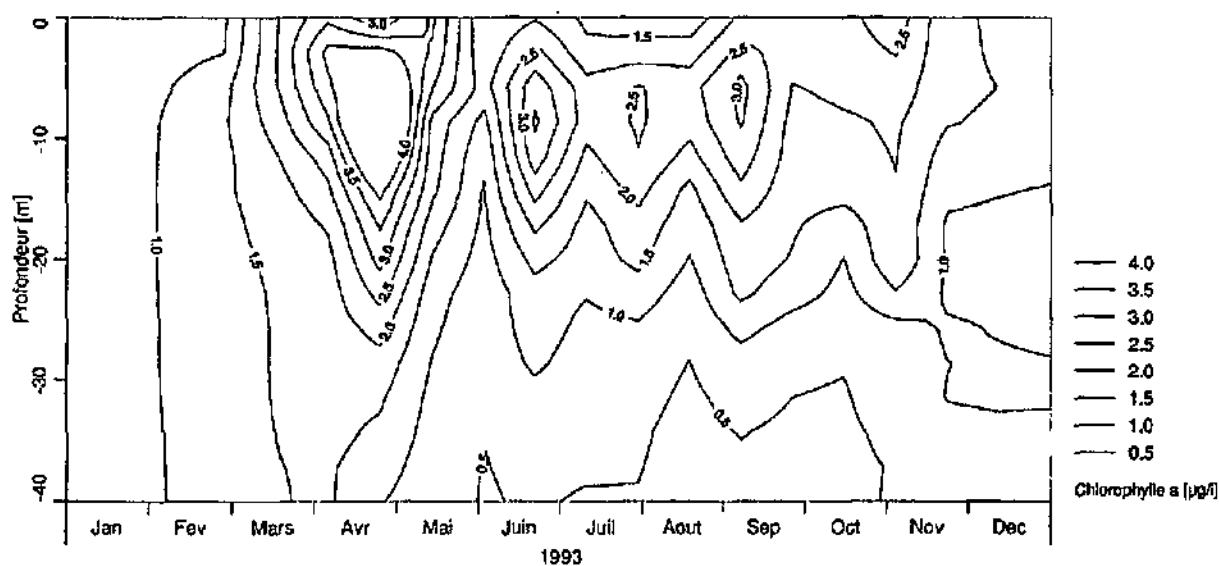
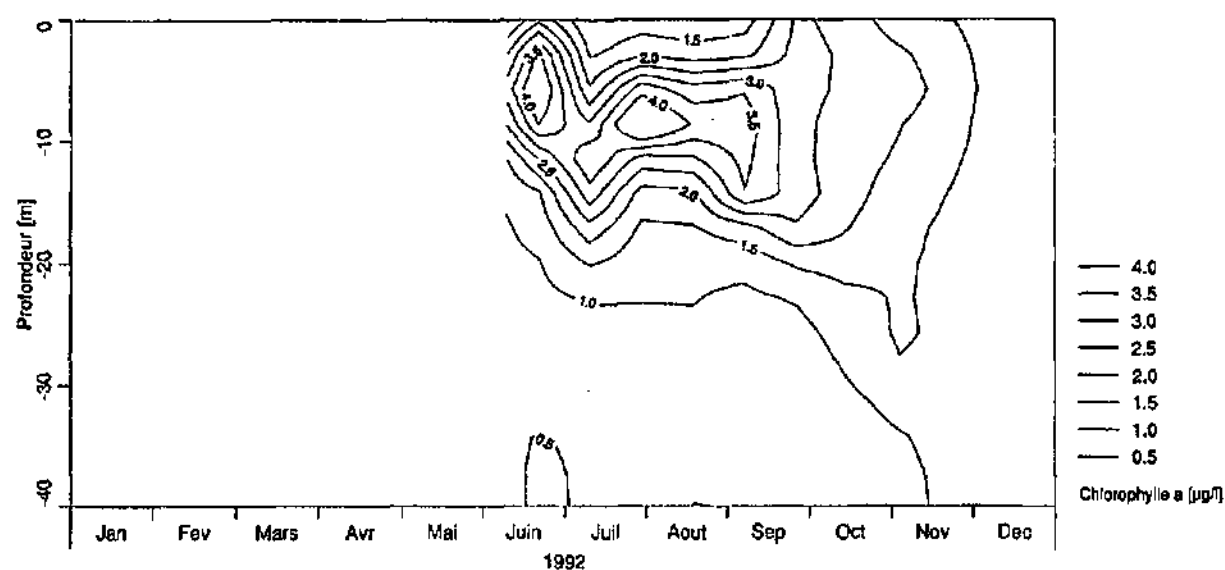


Fig.3.13. Evolution de la teneur en chlorophylle-a de juin 1992 à décembre 1994 dans la couche 0-40m

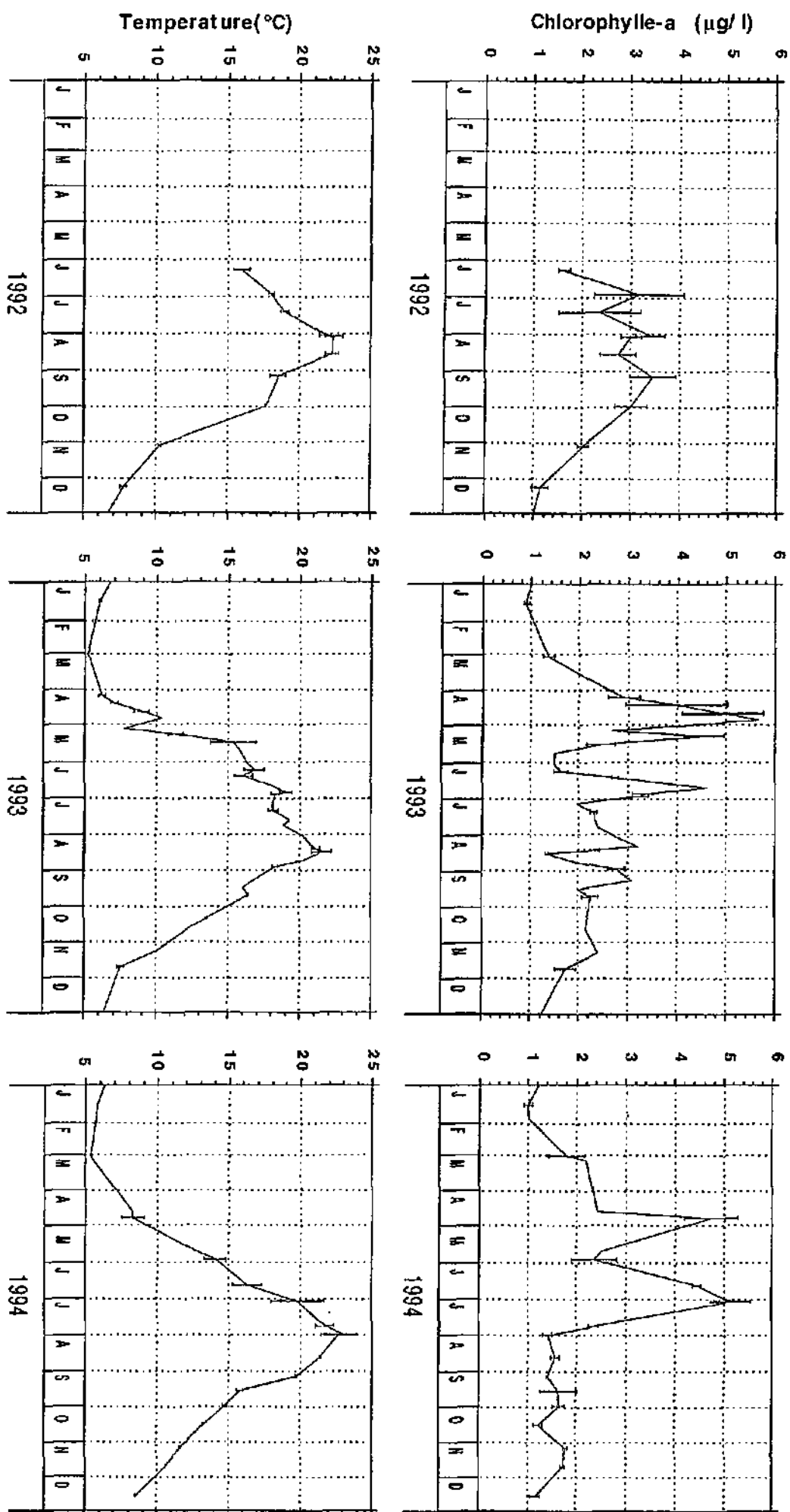


Fig.3.14. Evolution de la teneur en chlorophylle a (couche de 10m d'épaisseur de concentration maximale) et de la température épilimnique (moyenne 0-10m) de juin 1992 à décembre 1994: les barres d'erreur représentent la déviation standard des 3 mesures qui ont été prises en compte pour en faire une moyenne (en général il s'est agi des stations TOSE03, COCH02 et COCH04; l'absence de barre d'erreur signifie que la mesure a été effectuée sur une seule station (station TOSE03))

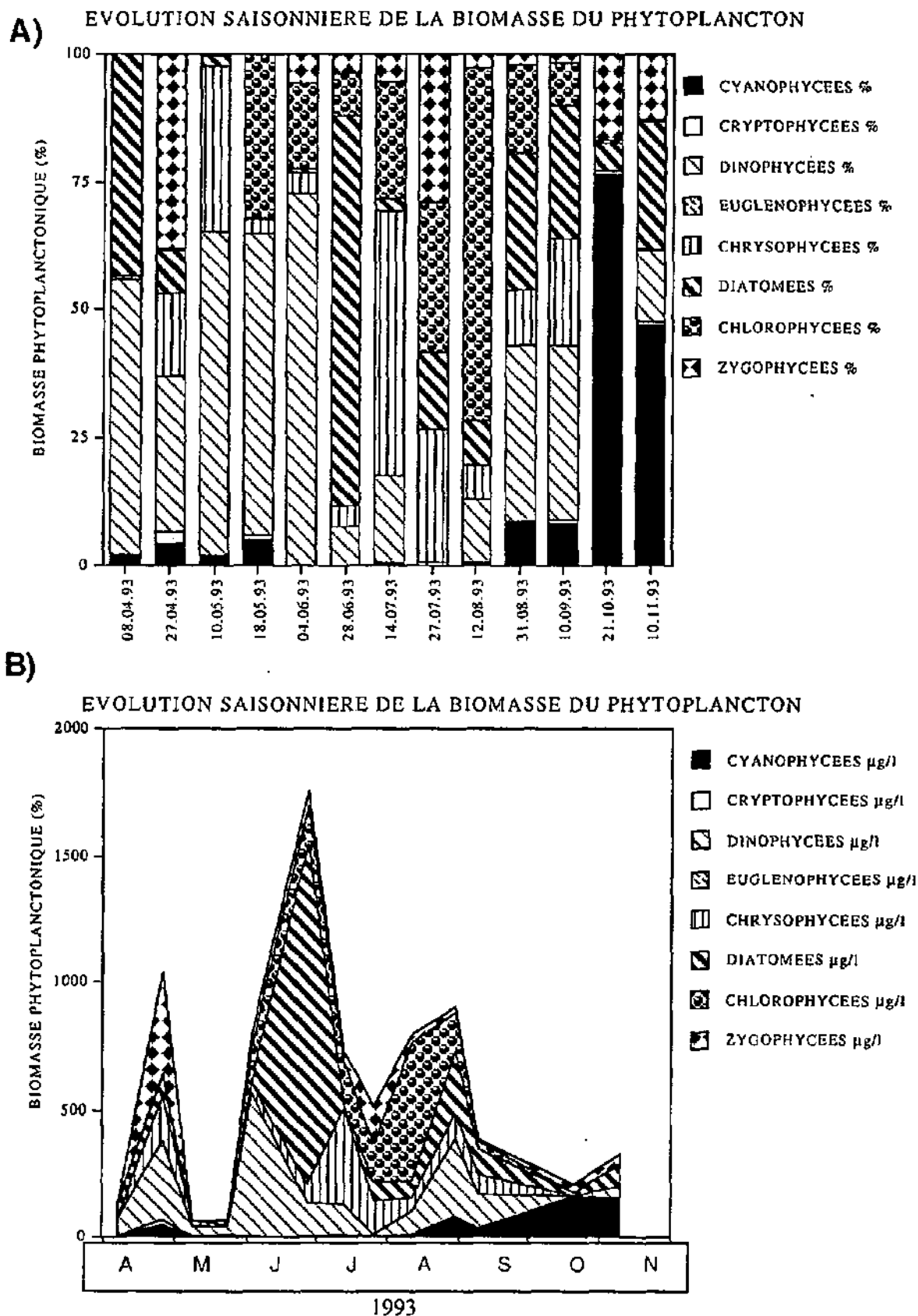


Fig.3.15. Evolution saisonnière de la biomasse en 1993; A) Variations saisonnières de la distribution des classes de phytoplancton en pourcentage de la biomasse totale; B) Valeurs absolues ($\mu\text{g/l}$); Analyses: J.-C. Druart (INRA, Thonon-les-Bains)

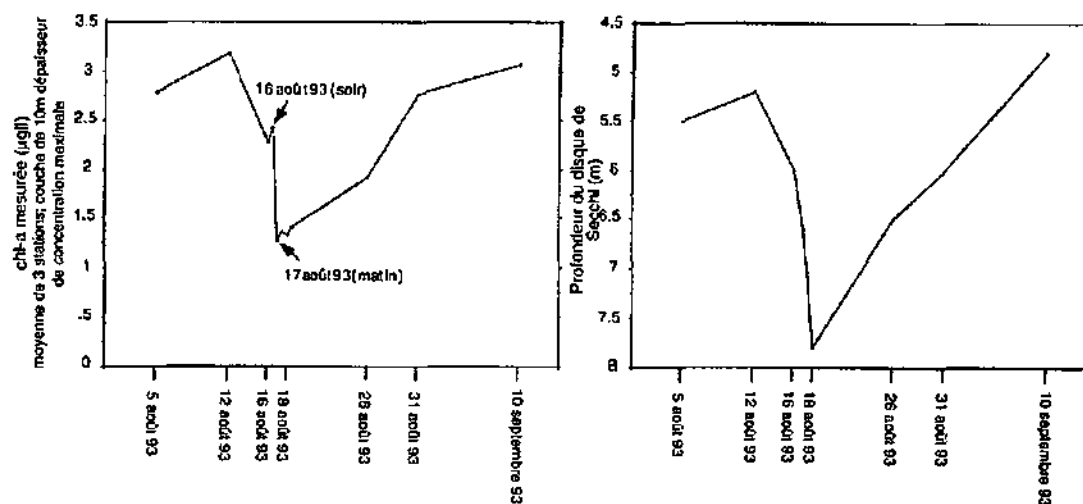


Fig.3.16. Evolution de la teneur en chlorophylle-a et de la transparence de Secchi du 5 août au 10 septembre 1993

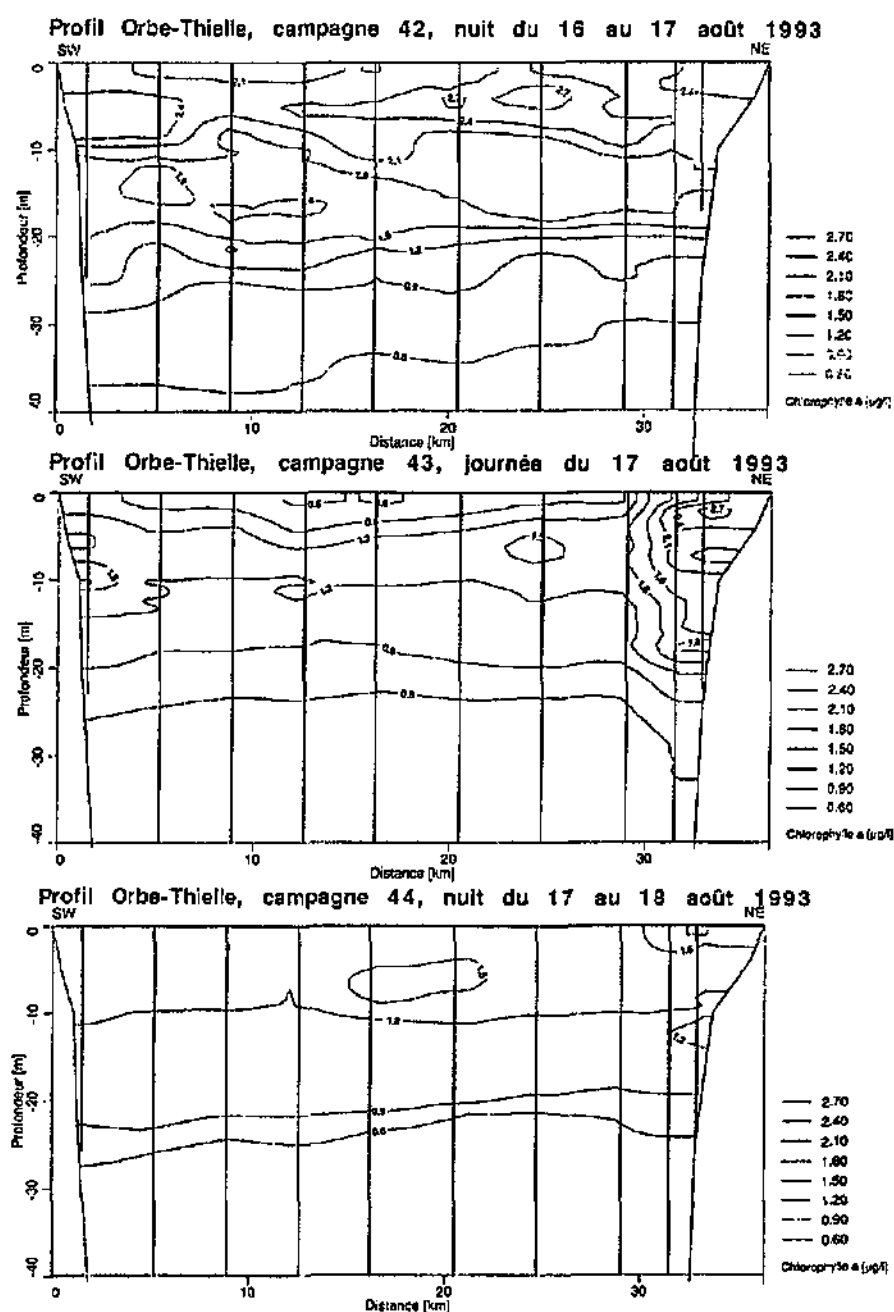


Fig.3.17. Evolution de la teneur en chlorophylle-a de la nuit du 16 au 17 août à celle du 17 au 18 août 1993 sur un profil "Orbe-Thielle"

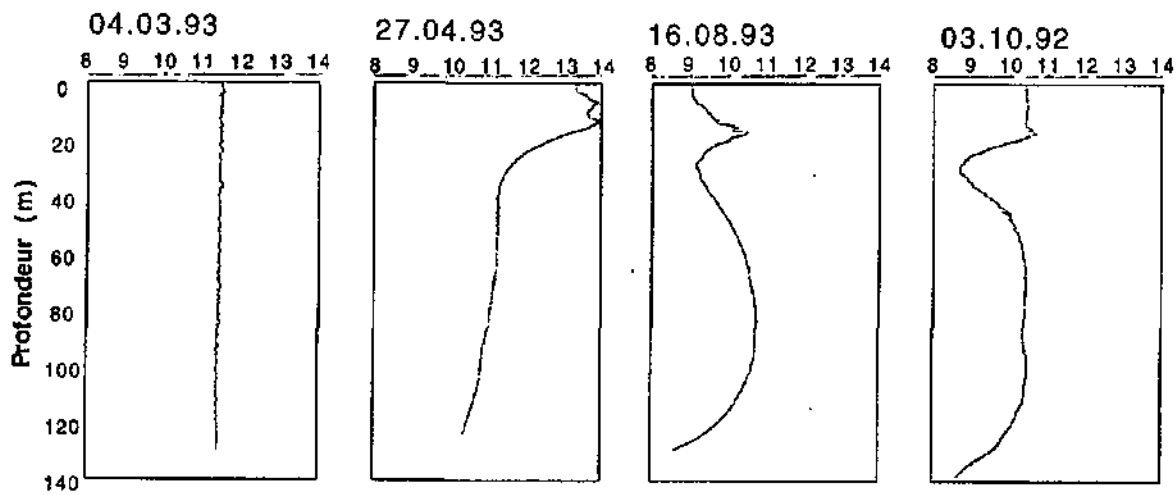


Fig.3.18. Profils caractéristiques de teneur en oxygène dissous (mg/l); 4 mars: situation d'homothermie; 27 avril: profil typique d'une forte production phytoplanctonique printanière; 16 août: individualisation des déficits métalimniques et hypolimniques saisonniers; 3 octobre: accentuation de ces mêmes déficits.

Station TOSE03

pH

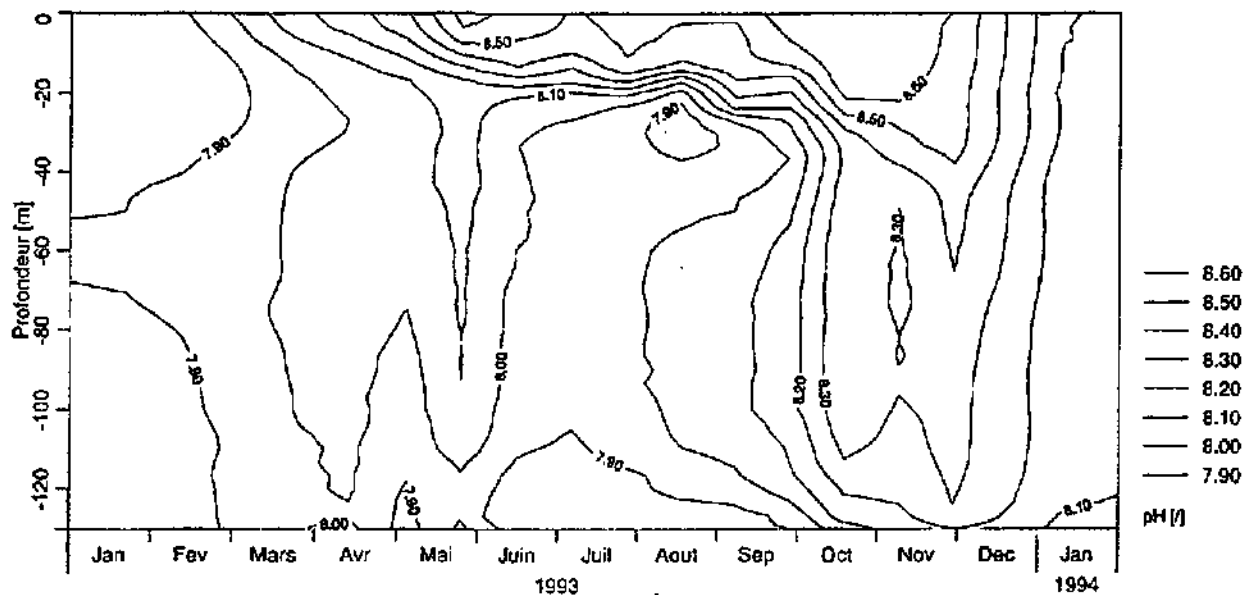


Fig.3.19. Evolution du pH au cours de l'année 1993; on remarquera ici également les déficits méta- et hypolimniques estivaux

Conductivité électrique Station TOSE 03

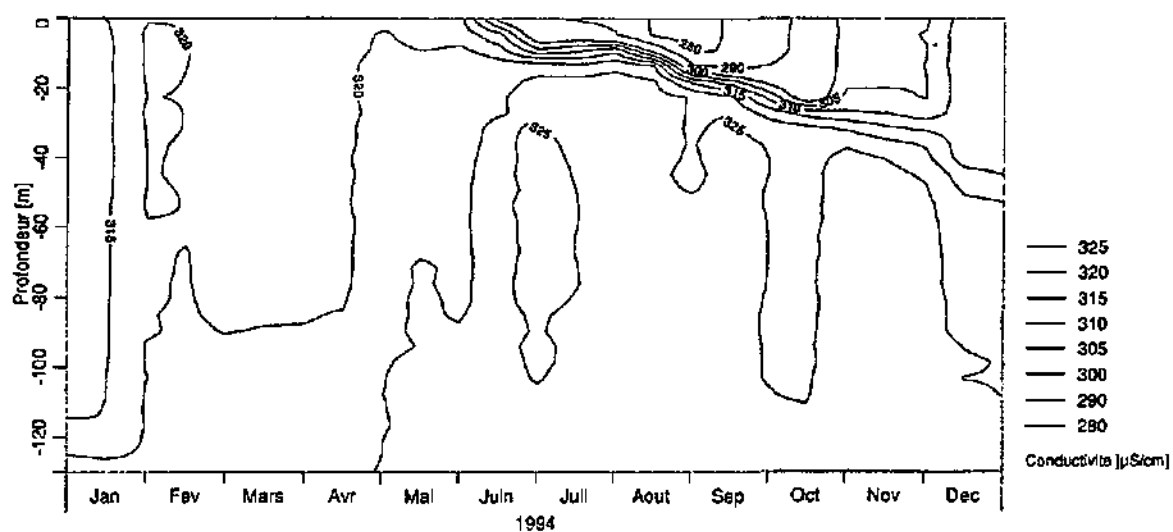
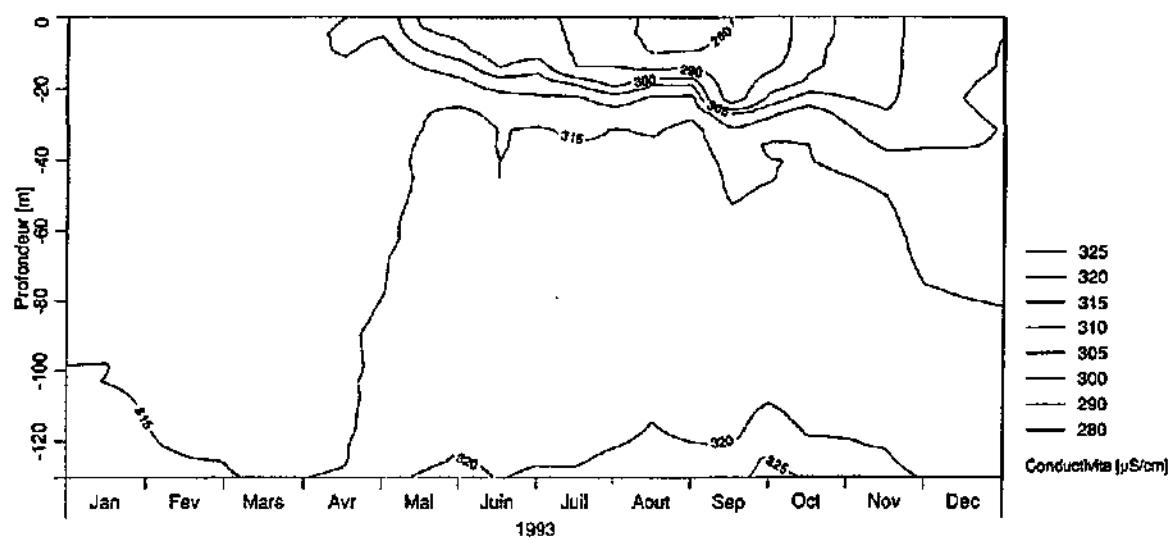
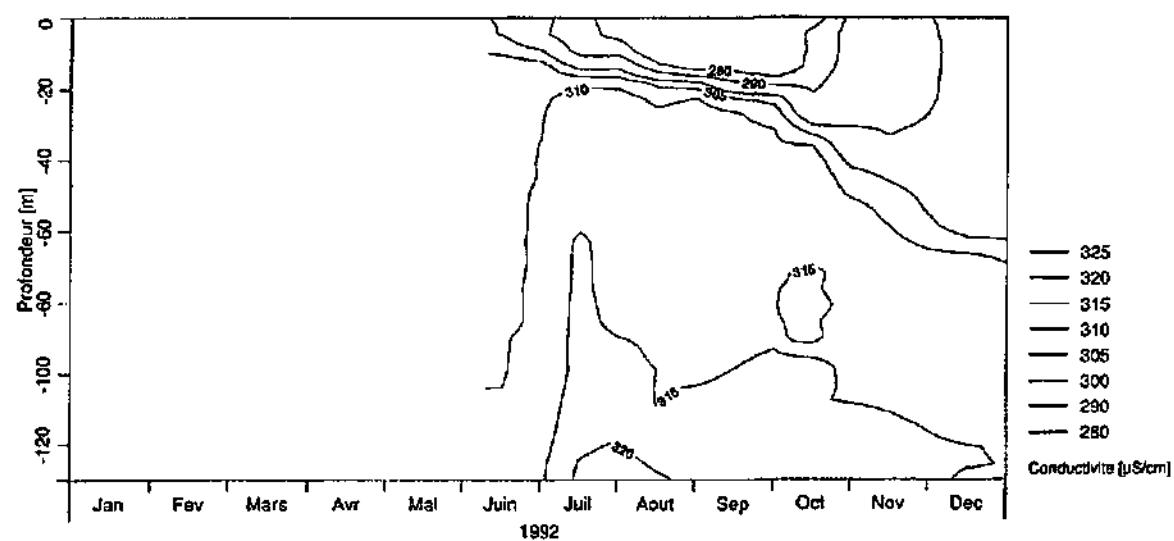


Fig.3.20. Evolution de la conductivité électrique
de juin 1992 à décembre 1994 (μS/cm); station TOSE 03

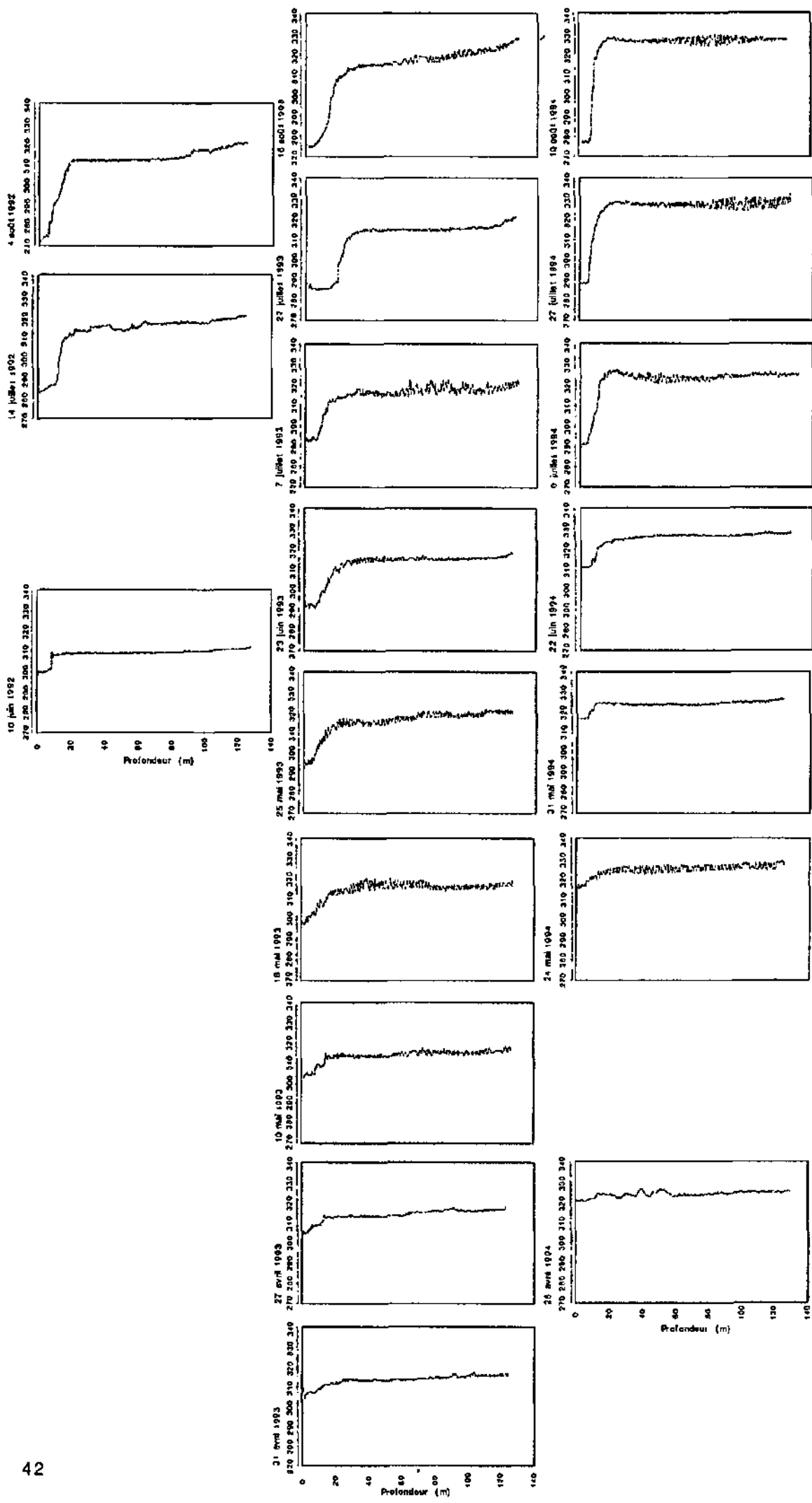


Fig.3.21. Installation du déficit épilimnique saisonnier de la conductivité électrique durant les années 1992, 1993 et 1994 (μS/cm); on remarquera que ce processus a été plus précoce en 1993 que lors des deux autres années

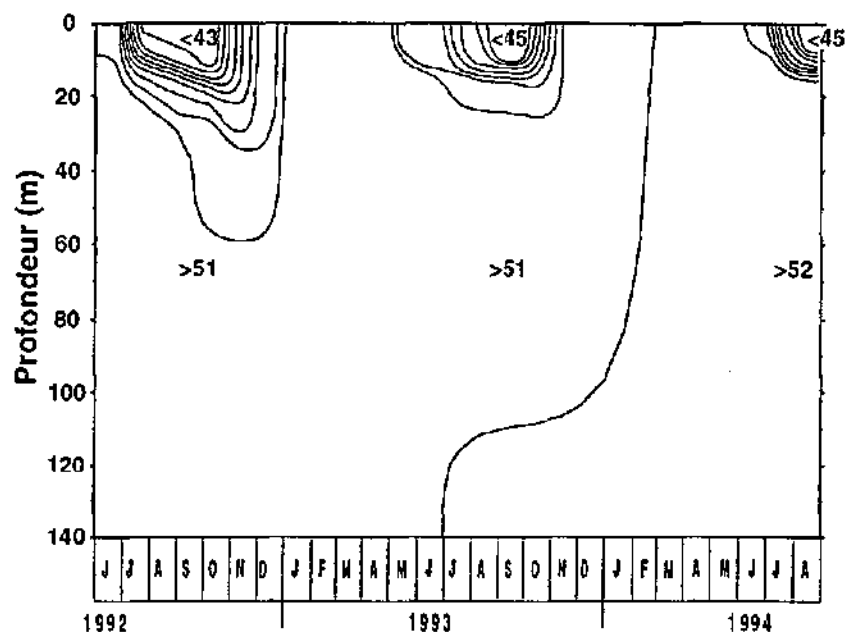


Fig.3.22. Evolution de la teneur en calcium dissous de juin 1992 à août 1994 (mg/l)

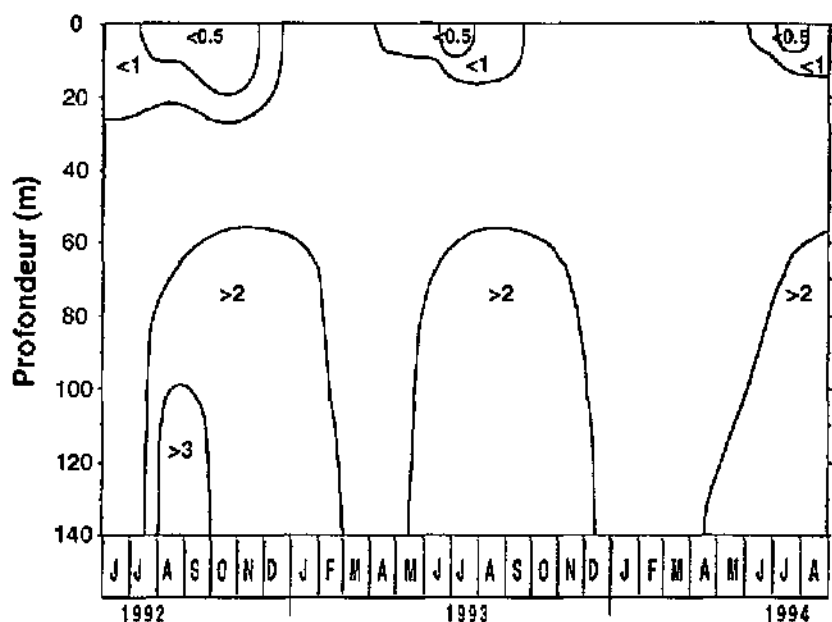


Fig.3.23. Evolution de la teneur en silice dissoute de juin 1992 à août 1994 (mg/l)

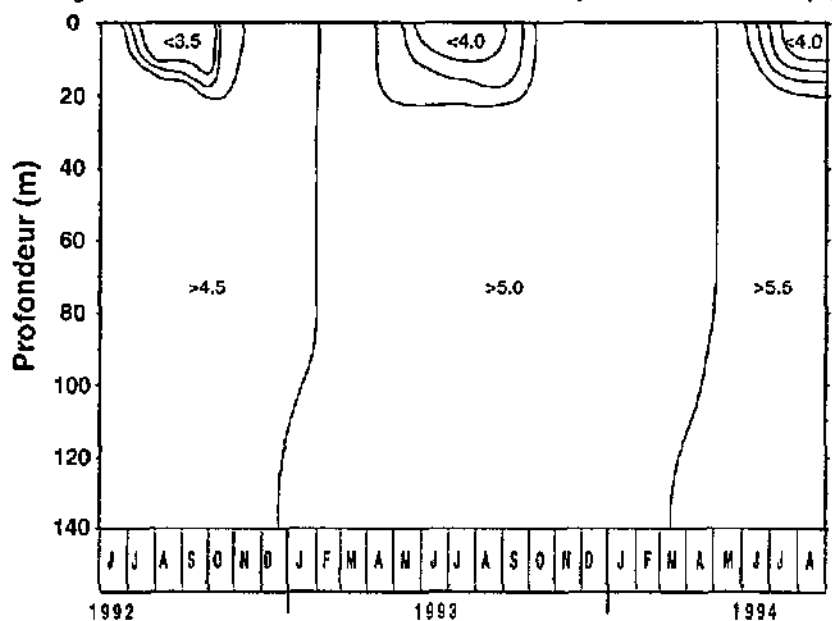


Fig.3.24. Evolution de la teneur en nitrates (mg/l de NO_3^-) de juin 1992 à août 1994; Isolignes: tous les 0.5 mg/l

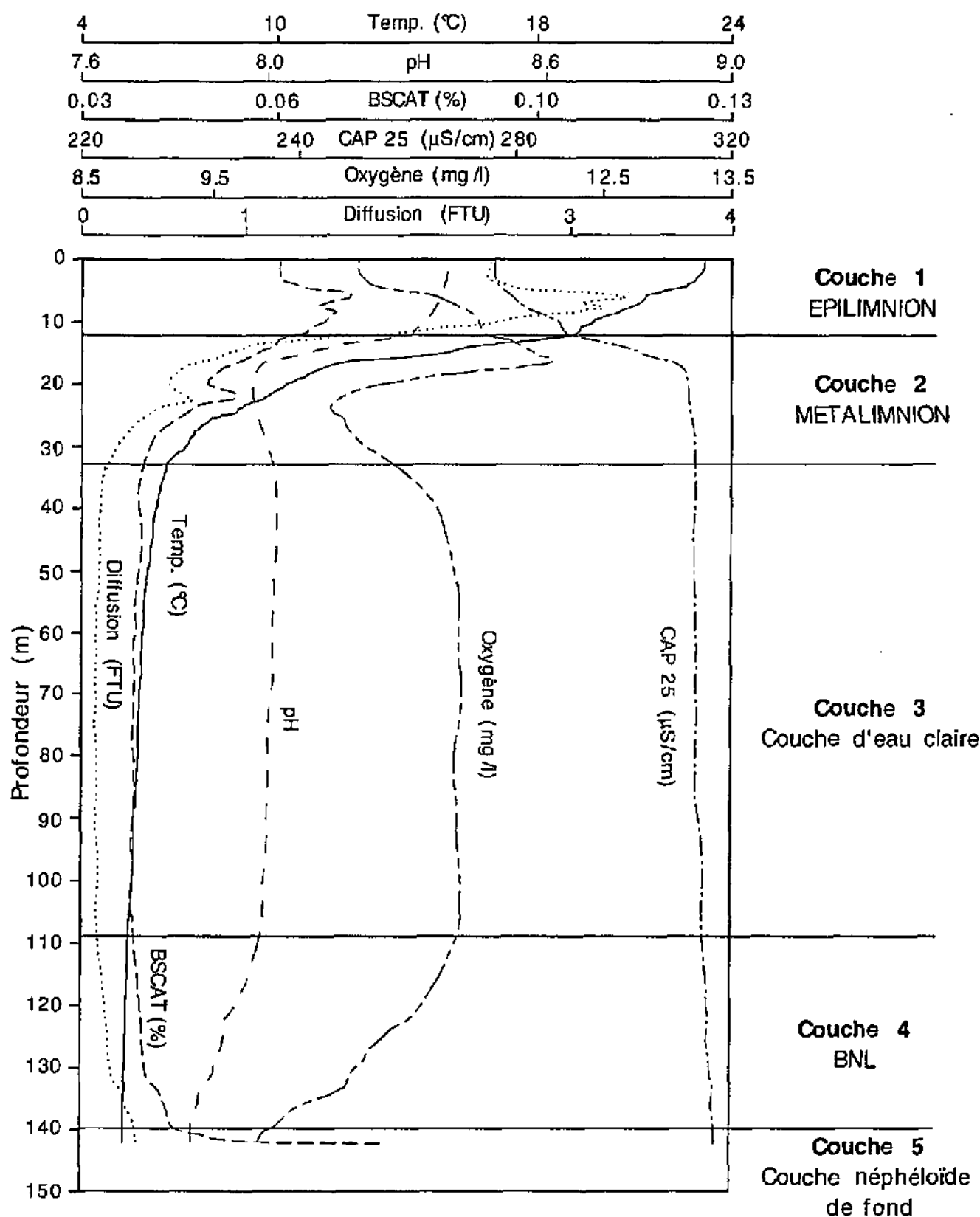


Fig.3.25. Profils de température, turbidité, rétrodiffusion, pH, conductivité et teneur en oxygène, station ORTH06, 3 août 1992; Subdivision de la colonne d'eau en différentes couches néphéloïdes caractéristiques de la période stratifiée

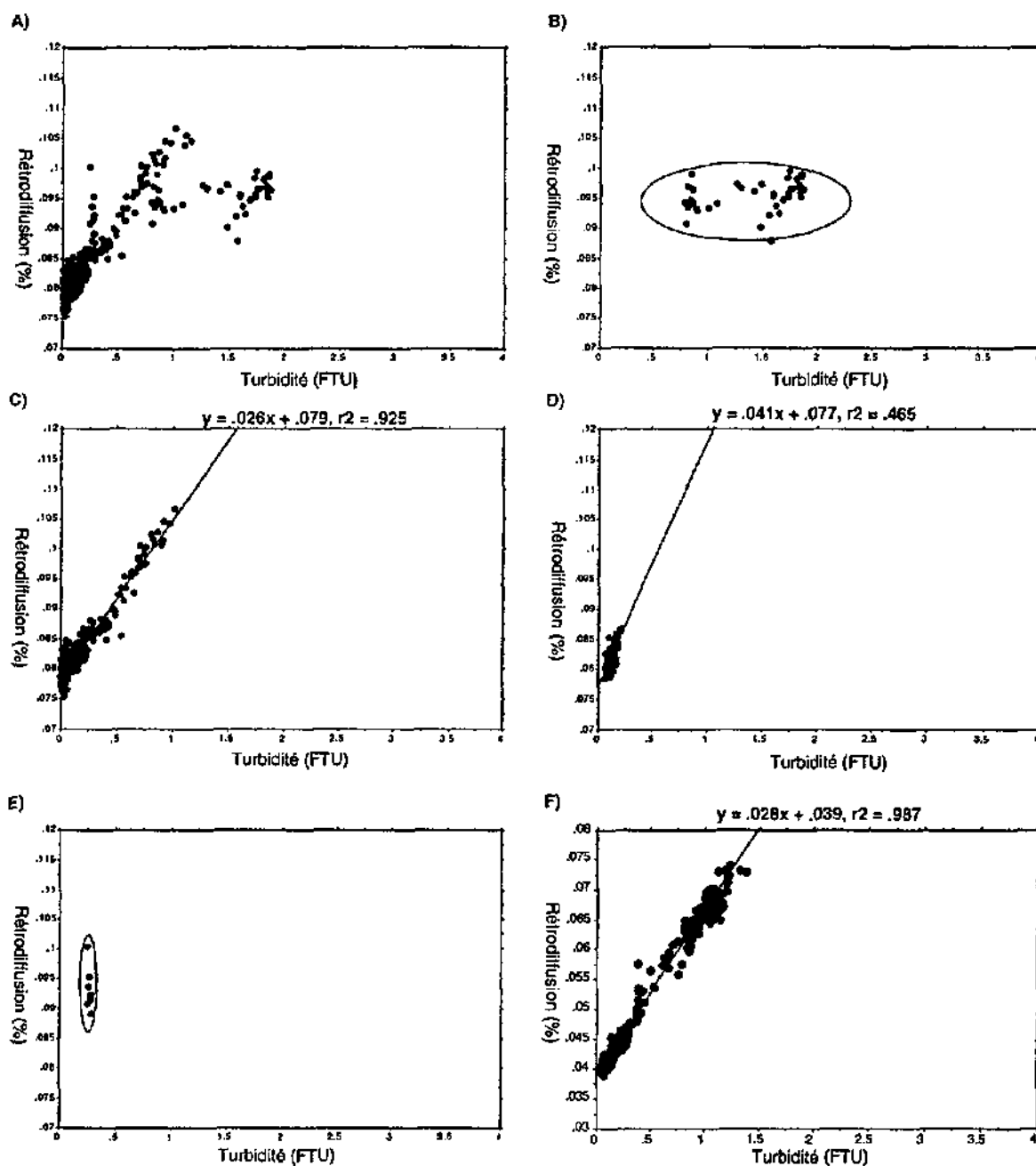


Fig.3.26. Relations générales rétrodiffusion versus turbidité des différentes couches néphéloïdes de la période estivale (station TOSE03, 17 août 1993); A) toute la colonne d'eau; B) Epilimnion; C) Méta- et hypolimnion; D) Couche néphéloïde benthique (BNL); E) Couche néphéloïde de fond; F) Relation rétrodiffusion versus turbidité caractéristique de la période faiblement à non stratifiée (TOSE03, 5.11.92)

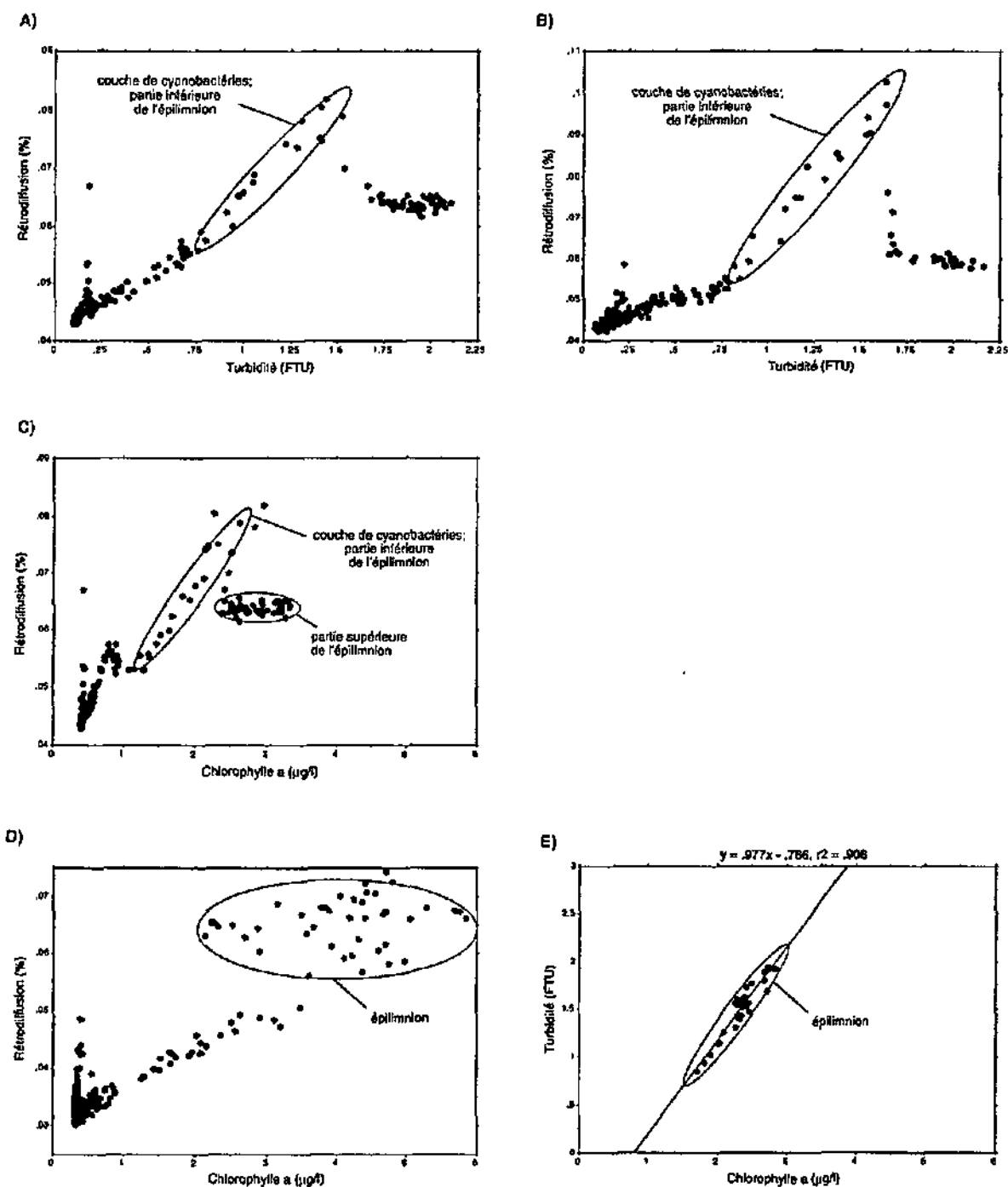
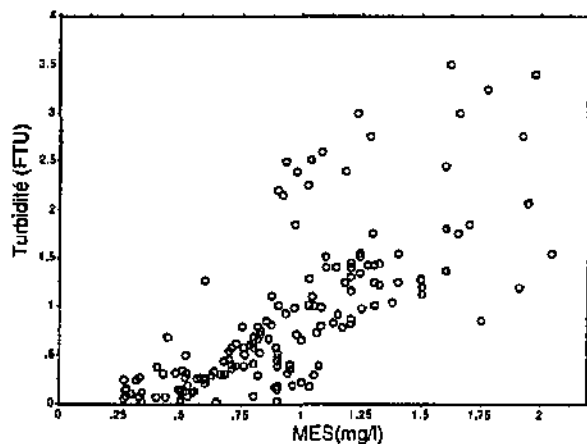
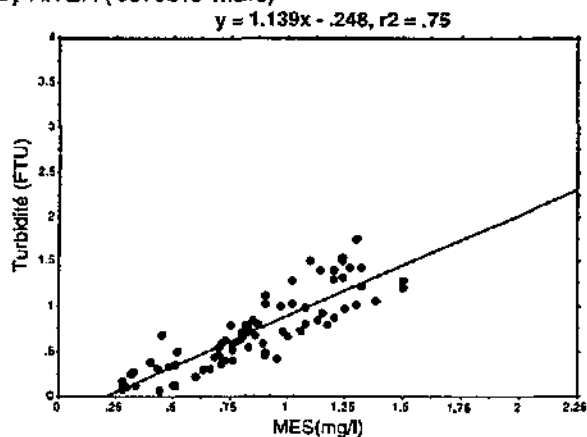


Fig.3.27. A) et B) Diagrammes rétrodiffusion versus turbidité en présence de cyanobactéries à la base de l'épilimnion (*Oscillatoria limnetica* et *Oscillatoria rubescens*), le 4 août 1992; A) station MEBR03; B) station ORTH02; C) Relation rétrodiffusion versus chlorophylle-a en présence de cyanobactéries à la base de l'épilimnion; D) Idem en absence de cyanobactéries; E) Relation turbidité versus chlorophylle-a caractéristique de la couche épilimnique

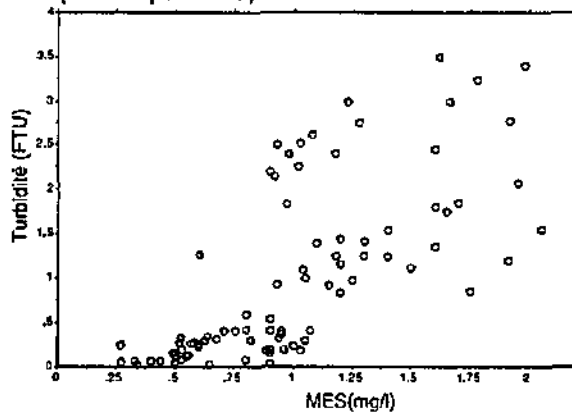
A) Toutes mesures confondues



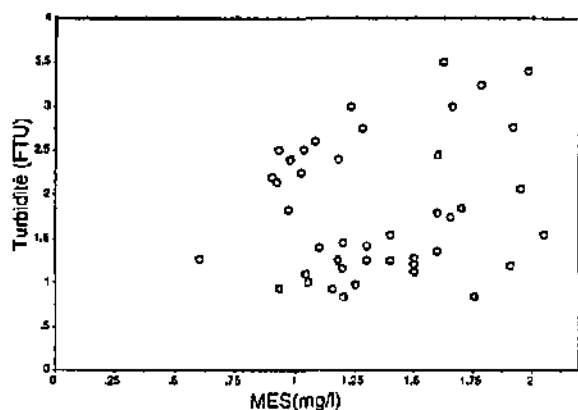
B) HIVER (octobre-mars)



C) ETE (avril-septembre)



D) Epilimnion estival



E) Hypolimnion estival

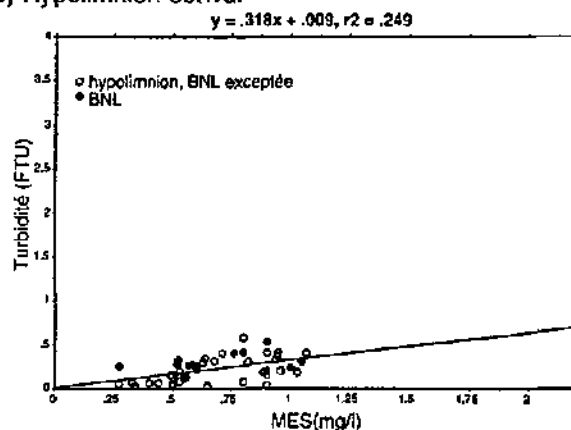


Fig.3.28. Relation turbidité versus charge totale; A) Toutes les mesures confondues; B) Période faiblement ou non stratifiée; C) Période stratifiée; D) Epilimnion en période stratifiée; E) Hypolimnion en période stratifiée

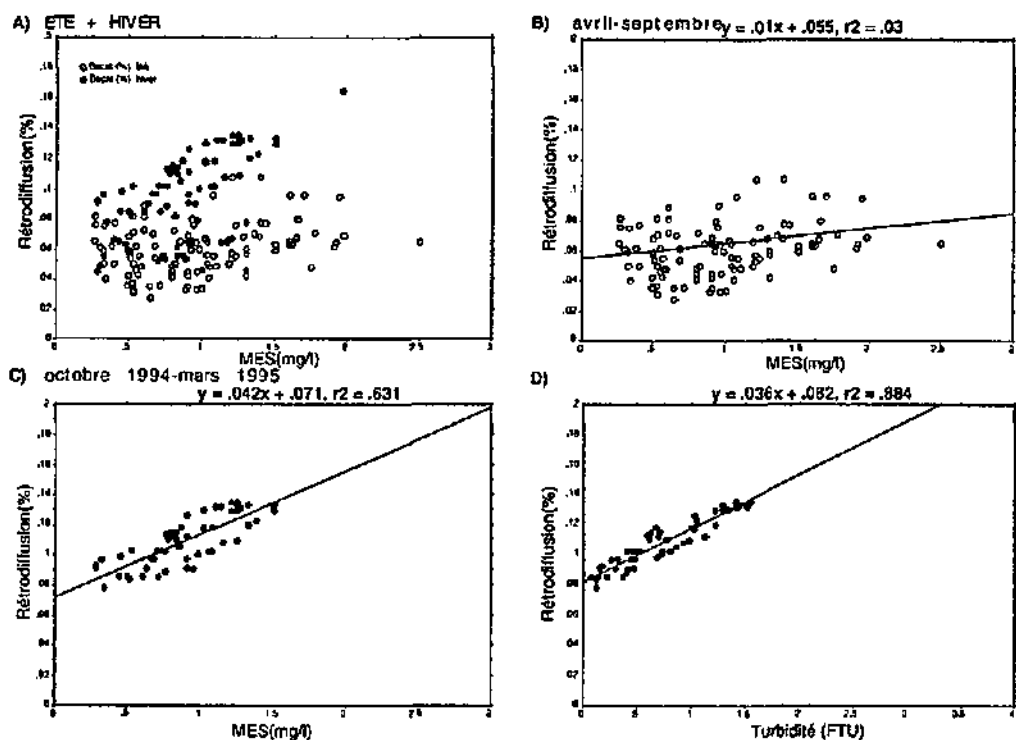


Fig.3.29. A) Relation rétrodiffusion versus charge totale, été + hiver; B) idem mais seulement été; C) idem, période octobre94-mars95; D) Relation rétrodiffusion versus turbidité, période octobre94-mars95

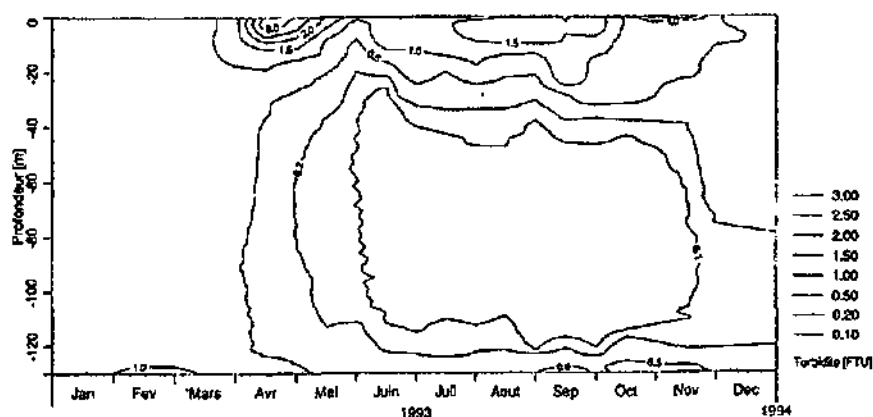


Fig.3.30. Evolution de la turbidité (en FTU) au cours de l'année 1993; un fort parallélisme est observé entre les évolutions de la turbidité épilimnique et de la production phytoplanctonique

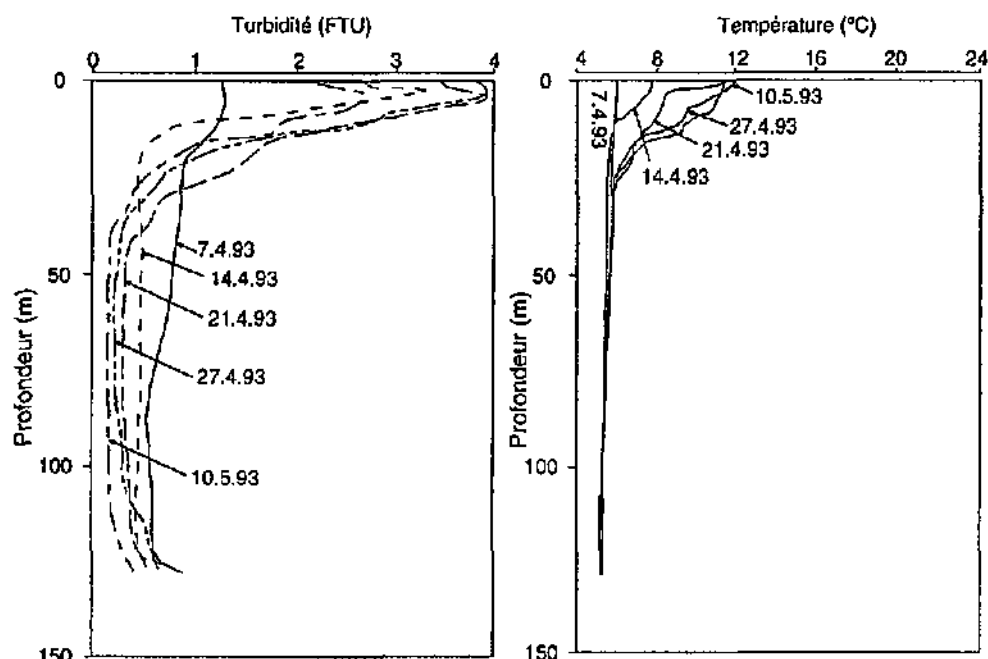
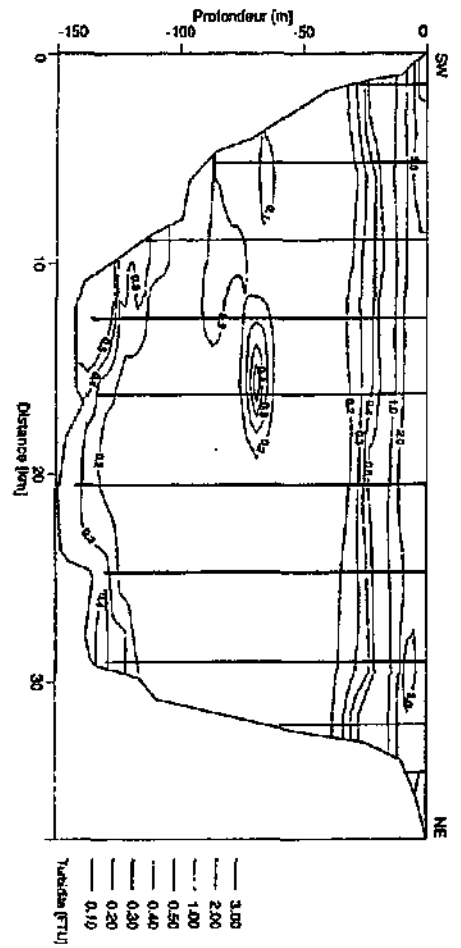
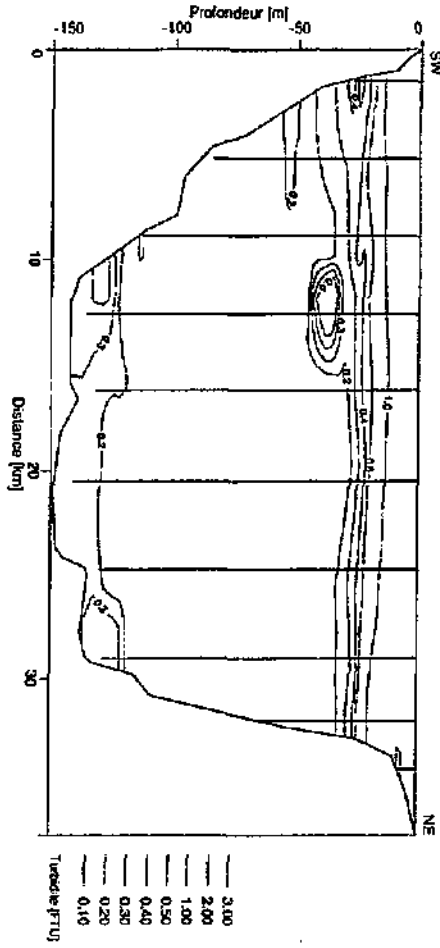


Fig.3.31. Evolution de la turbidité et de la température en début de printemps (année 1993)

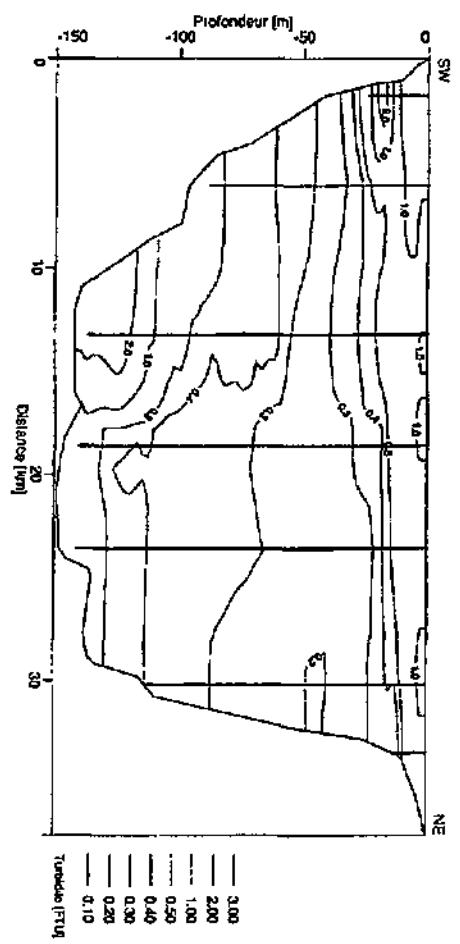
A) 03.06.92



B) 27.07.93



C) 31.05.94



D) 22.06.94

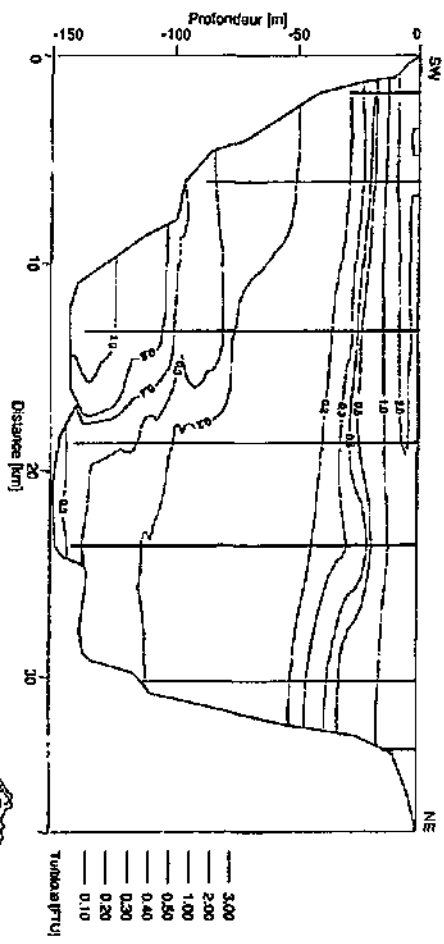
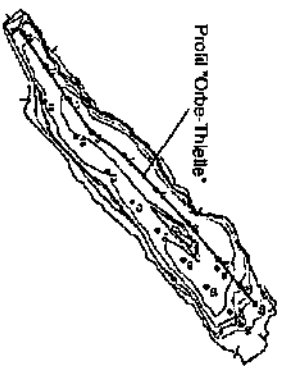


Fig.3.32. Cas typiques de variabilité spatiale de la turbidité en période stratifiée: longitudinales "Orbe-Thielle", A) panache inéstratifié dans l'hypolimnion; B) interstratification à la base du métalimnion; C) et D) transport à proximité du fond



CHAPITRE 4

Etude de la sédimentation actuelle

4.1. Introduction

Le but de cette étude est de mesurer et de comparer les flux particuliers à différentes stations dans le lac de Neuchâtel, et ce à la fois à des stations situées sur les tombants (pentes du bassin lacustre) et dans la plaine profonde, ceci afin de mieux comprendre les processus sédimentaires de ce lac de manière générale et notamment:

- la dynamique des particules et notamment la vitesse à laquelle les particules sont éliminées de la colonne d'eau.
- les mécanismes de précipitation de la calcite: influences respectives de l'équilibre chimique et de l'activité biologique, reconnaissance de l'étendue de la période durant laquelle la calcite précipite et tentative de bilan quantitatif.

- la remise en suspension de sédiment s'étant révélée importante dans le lac de Neuchâtel, nous tenterons d'appréhender les facteurs principaux qui gouvernent

ce processus, et notamment la relation de la resuspension avec l'intensité du vent, l'état de la stratification thermique et la profondeur d'eau principalement. Les mécanismes de transport des particules seront également abordés; l'influence de la stratification thermique et de l'intensité du mélange vertical seront étudiés.

- un des buts est également de comparer les flux sédimentaires obtenus avec ceux déduits de l'étude des sédiments récents. Une tentative de quantification de la resuspension sera présentée ainsi qu'une estimation de l'influence de la resuspension sur le recyclage du phosphore.

- une étude des isotopes stables de l'oxygène et du carbone des carbonates récoltés dans les pièges a été entreprise par Maria Letizia Filippi, de l'Institut de minéralogie et de pétrographie de l'Université de Lausanne (Filippi et al., 1998). Cette étude a eu pour buts de (i) déterminer si la calcite précipite en équilibre avec l'eau environnante, (ii) appréhender l'étendue de la contamination du signal par les carbonates allochtones, (iii) déterminer l'origine de la calcite récoltée en hiver, (iv) comparer ensuite les résultats obtenus avec ceux du sédiment.

L'analyse pollinique du matériel récolté par pièges à sédiments a été entreprise par Pascale Ruffaldi, du Laboratoire de chrono-écologie de l'Université de Besançon. Ses buts sont de mieux comprendre la dynamique sédimentaire relativement peu connue des pollens dans un grand lac et la cause de la répartition spatiale différentielle des pollens qui est observée au niveau du sédiment.

4.2. Etude de la matière particulaire des principaux affluents du lac de Neuchâtel

Cette étude d'envergure limitée vise à déterminer la composition générale du matériel amené au lac par ses principaux affluents.

Parmi les 10 affluents les plus importants du lac de Neuchâtel, trois totalisent plus de 50% des apports liquides: le canal de la Broye (débit moyen: $Q_m=13.1\text{m}^3/\text{s}$), l'Arcuse ($Q_m=12\text{m}^3/\text{s}$) et la Thielle (ou Orbe) ($Q_m=11.9\text{m}^3/\text{s}$). Les autres affluents importants sont le Seyon, la Mentue, l'Arnon, la Serrière, le Bey, le Buron et le Canal Oriental (cf. Tab.1.2.). La plupart d'entre eux ont un bassin versant jurassien aux assises jurassiques et crétacées partiellement recouvertes de dépôts morainiques et fluvio-glaciaires. Seuls la Mentue, le Buron et la Broye ont un bassin versant principalement constitué d'assises molassiques, elles aussi partiellement recouvertes de dépôts morainiques et fluvio-glaciaires (Fig.1.1.).

4.2.1. Débits solides

Les principaux affluents ont été échantillonnés en période de crues en vue de comparer leurs débits solides et de déterminer la composition minéralogique de leurs apports. L'échantillonnage s'est limité aux sept premiers affluents mentionnés ci-dessus, les autres ayant été négligés pour des raisons pratiques.

Lors des 3 crues étudiées, 10 litres d'eau ont été prélevés et la charge solide mesurée. Les résultats sont présentés ci-dessous, au Tableau 4.1.:

	5.avr.92	5.avr.92	2.jui.92	2.jui.92	17.nov.92	17.nov.92
	MES (mg/l)	débit (m3/s)	MES (mg/l)	débit (m3/s)	MES (mg/l)	débit (m3/s)
Mentue	648	7.95	567	2.73	338	6.94
Seyon	191	3.39	38.8	0.42	36.7	3.48
Arcuse	63	62.7	12.3	16.4	38.8	55.9
Arnon	21	?	16.7	?	19	?
Thielle	21	41.5	22.2	22	42.3	45.1
Serrière	?	?	?	?	12.3	?
Broye	?	?	7.4	?	8.5	?

Tab.4.1. Charges solides en suspension dans les principaux affluents du lac de Neuchâtel lors de trois périodes de crues: seul le Seyon n'est pas en crue lors de la période du 2 juin 1992

Il est possible de comparer très grossièrement les apports solides au lac de ces différents affluents en multipliant leur débit liquide moyen par la charge moyenne enregistrée lors de ces trois crues, ce qui nous donne les résultats suivants:

Mentue	818[gl]	Arcuse	456[gl]
Thielle	339[gl]	Seyon	113[gl]
Broye	104[gl]	Arnon	54[gl]
Serrière	30[gl]		

Ces résultats ne sont bien entendus qu'indicatifs. Il est tout de même intéressant de constater que parmi les trois affluents principaux, la Broye montre des débits solides relativement faibles, ce qui est logique étant donné qu'il s'agit d'un canal, et que parmi les affluents de moindre importance le Seyon et surtout la Mentue sont susceptibles d'avoir des débits solides aussi importants que l'Arcuse et la Thielle. Les faibles débits solides de l'Arnon et de la Serrière peuvent être reliés au fait que ces deux affluents sont issus de sources vaclusiennes. A noter que le Buron, qui n'a malheureusement pas été échantillonné, est également susceptible de fournir des débits solides élevés, les caractéristiques de son bassin versant étant similaires à celles du bassin d'alimentation de la Mentue.

4.2.2. Minéralogie de la matière particulaire des affluents

Les résultats de la composition minéralogique du matériel laissent apparaître deux pôles (Fig.4.1.):

- celui représenté par l'Arcuse avec une teneur en calcite avoisinant 60% et des teneurs en silicates faibles.
 - celui représenté par la Mentue avec une teneur en silicates qui avoisine 80% et des teneurs faibles en carbonates.
- La matière en suspension des autres affluents présente des caractéristiques intermédiaires entre ces deux pôles, plus proches cependant de la composition de l'Arcuse que de celle de la Mentue.

Le rapport (Ankérinite+Dolomite)/(Ankérinite+Dolomite+Calcite) $[(A+D)/(A+D+C)]$ permet de quantifier la proportion de carbonates allochtones dans le sédiment et le matériel récolté par les pièges à sédiments. Cette méthode a déjà été utilisée, notamment par Kelts (1978). L'utilisation de ce rapport se justifie par le fait que ces trois minéraux se trouvent dans le même type de roches et qu'ils subissent un mode d'érosion semblable. Les moyennes de ce rapport ont des valeurs similaires dans le matériel des rivières jurassiennes. Les valeurs les plus élevées concernent la Mentue (Fig.4.1.).

La minéralogie des phyllosilicates de la fraction inférieure à 2 μ m a également été étudiée. Chlorite, micas de composition intermédiaire entre illite et phengite d'après le diagramme de Rey et Kübler (Rey & Kübler 1983), smectites (en réalité des interstratifiés I/S avec plus de 80% de couches gonflantes) et kaolinite sont présents dans les principaux affluents. Les proportions relatives de ces 4 types de phyllosilicates ont été calculées d'après la hauteur des pics d'intensité maximale (Fig.4.2.). Seules les teneurs en kaolinite varient sensiblement, elles sont maximales dans l'Arcuse (13%) et minimales dans la Mentue (3%). La présence de kaolinite a été reconnue dans les assises jurassiques et crétacées du Jura (Persoz & Romane 1976; Persoz 1982; Adatte & Rumley 1984; Ramseier 1985; Adatte 1988), dans les accumulations latéritiques éocènes (Vernet 1963; Aubert 1975), dans les sols actuels (Pochon 1974; Pochon 1975; Pochon 1978) ainsi que dans les apports éoliens (Kübler et al. 1990). Par contre sa présence dans la molasse et dans la moraine alpine est douteuse (Peters 1969; Monbaron 1973; Zimmermann et al. 1976; Monnier 1982; Turberg 1987). Cette répartition explique donc bien le fait que la kaolinite soit présente en proportions plus importantes dans l'Arcuse, pôle minéralogique "jurassien", que dans la Mentue.

La présence de talc n'a été détectée dans aucun des affluents principaux du lac lors de notre étude. Sa présence en relativement grandes quantités a cependant été certifiée dans le Seyon et la Serrière au milieu des années 80 par Bapst (1987), ainsi que dans la fraction inférieure à 1 μ m de la Noiraigue (affluent de l'Arcuse) par Attcia (comm.pers., 1996). Nous reviendrons sur l'origine de ce minéral au chapitre 5.

4.2.3. Géochimie de la matière particulaire des affluents

Les teneurs en carbone minéral, carbone organique et azote total de la matière en suspension des affluents ont été analysées afin d'obtenir une estimation quantitative de la composition générale du matériel. Les résultats sont présentés ci-dessous, au Tableau 4.2.:

	Cmin (%)	Carbonates (%)	Corg (%)	N (%)	Corg/N
Arcuse (N=6)	5.53	46.1	4.25	0.33	13.6
Thielle (N=2)	3.29	27.4	4.07	0.31	13.0
Seyon (N=2)	2.51	20.9	3.79	0.31	12.4
Mentue (N=2)	1.34	11.2	2.87	0.28	10.2
phytoplancton					5.2
		moyenne			moyenne
		26.4			12.2

Tab.4.2. Composition élémentaire C et N du matériel en suspension des principaux affluents du lac de Neuchâtel

Les teneurs en carbonates sont donc plus faibles que celles déduites de la minéralogie, les tendances générales étant toutefois respectées. Les rapports C/N sont compris entre 10 et 14. Un rapport C/N de 5,2 a été obtenu pour un échantillon récolté sur le filet d'un pêcheur en octobre 1993 et composé principalement de cyanobactéries. Ces valeurs sont compatibles avec celles des sols du bassin versant; les sols sous prairies ont

généralement un rapport C/N compris entre 11 et 12, les sols sous hêtraies entre 12 et 16, et jusqu'à 20 pour les sols sous forêts d'épicéa (Gobat, comm.pers.). A noter que la matière particulaire des affluents du lac Léman a des valeurs de C/N comprises entre 9 et 17 (Thomas et al. 1991).

4.3. Etude de la matière en suspension dans le lac

4.3.1. Granulométrie

La granulométrie des particules en suspension a été réalisée à l'aide du granulomètre "Galai CIS-1 Oriel" à faisceau laser en mode de flux continu (cf Chapitre 2 ainsi que Jantschik (1992)). Les résultats détaillés sont présentés en Annexe 4.2., alors que les moyennes par profondeur dans la colonne d'eau sont présentées ci-dessous, au Tableau 4.3.:

prof (m)	0.5-1µm	1-2µm	2-4µm	4-8µm	8-16µm	16-31µm	>31µm	médiane(µm)	moyenne(µm)
10	3.99	10.42	29.55	38.83	15.11	2.10	0.00	4.67	5.57
30	5.40	11.46	31.59	42.25	8.47	0.83	0.00	4.25	4.48
60	14.00	15.62	33.47	33.19	3.72	0.00	0.00	3.21	3.46
BNL	6.05	11.15	36.26	36.83	9.36	0.34	0.00	4.05	4.36

Tab.4.3. Granulométrie des particules à différentes profondeurs d'eau (analyses effectuées sans traitement des échantillons)

Ces données ne concernent que les périodes estivales 1992 et 1993. Elles indiquent que la moyenne des tailles n'évolue pas de manière sensible en fonction de la profondeur, excepté peut-être en ce qui concerne la couche épilimnique (10m) où la moyenne des tailles est légèrement plus élevée. La majorité des particules ont une taille comprise entre 2 et 8µm. Si on compare ces résultats à ceux de l'analyse granulométrique du matériel des pièges à sédiments ainsi que du sédiment de surface (Fig.4.3.), on constate une légère différence dans le sens d'une moyenne (mean) plus faible dans le cas de l'analyse de l'eau du lac, 4.47µm contre 9.83µm en moyenne pour les pièges de la période estivale (Annexe 4.4.). Ceci pourrait être dû à une sous-représentation des particules de grande taille lors de l'analyse de l'eau (agrégats, calcites de grande taille), particules qui sont plus rapidement évacuées de la colonne d'eau.

On peut par contre constater une bonne concordance entre la granulométrie du matériel des pièges à sédiments et celle du sédiment de surface.

4.3.2. Minéralogie des particules en suspension dans le lac

Bapst (1987) détermine quatre "masses aquatiques" d'après la répartition du talc et de la kaolinite dans les suspensions du lac: bassin de Neuchâtel (talc + kaolinite), bassin NW ou vallée nord (kaolinite, talc rare), bassin SE ou vallée sud (talc, kaolinite absente), haut-lac (talc, kaolinite absente).

Il a d'autre part détecté la présence dans les suspensions de plusieurs minéraux endogènes ou authigènes, des oxalates de calcium (whewellite et weddellite), de la vaterite (carbonate de calcium), de la vivianite (phosphate de fer) ainsi que de l'hydroxyl-apatite.

Nos résultats (Annexe 4.3.) montrent que kaolinite et talc sont présents ponctuellement en traces dans les trois bassins principaux du lac (Neuchâtel, nord-ouest et sud-est). D'autre part, seuls le talc et l'apatite ont été déterminés dans les eaux du lac en addition des minéraux présents dans le matériel des affluents.

Le problème de la présence du talc sera discuté au chapitre 5. Les résultats obtenus montrent la difficulté de différencier des masses d'eau spécifiques sur la base de l'analyse minéralogique de la matière en suspension.

4.4. Expérimentation par pièges à sédiments

4.4.1. Méthodologie; type de pièges adopté

De nombreuses études concernent la recherche d'une configuration adéquate des pièges à sédiments (Hargrave & Burns 1979; Bloesch & Burns 1980; Gardner 1980a; Gardner 1980b). Un rapport exhaustif a été publié par le U.S. Global Ocean Flux Study (1989). Ces recherches ont conclu que la forme cylindrique permet d'obtenir des flux proches de la réalité. Le U.S. GOFs (1989) conseille d'adopter un rapport hauteur/diamètre (H/D) suffisamment élevé afin de maintenir une couche d'eau calme au fond du piège: H/D=3 pour un nombre de Reynolds de 6000 (courant de 6cm/s pour D=10cm), H/D=8 pour un nombre de Reynolds de 20000 (courant de 20cm/s pour D=10cm). Nous avons adopté un rapport H/D = 10 (D=10cm, H=1m), ce qui semble amplement suffisant d'après ces chiffres. Il a également été montré que des rapports H/D élevés augmentent l'épaisseur de la couche d'eau calme au fond du piège (Brunskill 1969). Le diamètre choisi apparaît également suffisant en regard des résultats de Blomqvist et Kofoed (1981), qui ont observé un biaisage des résultats en-dessous d'un diamètre de 3-4cm. Les utilisations de grilles et de poisons étant sujettes à controverse, nous les avons évitées et avons adopté de simples cylindres de PVC appariés. Ces cylindres ont été disposés à différentes profondeurs le long d'une ligne soutenue par des flotteurs submergés. Le retrait des pièges s'est fait à intervalles mensuels (32,4 jours $\pm$ 9,8).

Le dispositif est présenté à la Figure 4.4., la localisation des stations à la Figure 4.5. Durant l'été 1992, 4 lignes de pièges ont été disposées sur les tombants (40m de fond), deux sur le tombant NW (Cortailod et Chez-le-Bart)

et deux sur le tombant SE (Chevroux et Toblerones). La station de Cortaillod est située à environ 150m du mont (limite plateau lacustre-tombant), alors que cette distance est d'environ 300m pour la station de Chevroux. Au cours de l'hiver 1992-1993, un nouveau dispositif a été choisi avec le maintien de deux stations sur les tombants (Chevroux et Cortaillod), et le placement de trois stations en zone profonde: Chez-le-Bart (bassin NW), Serrières (bassin de Neuchâtel) et Vallée Sud (bassin SE). Au cours de la saison estivale suivante et jusqu'à la fin de l'expérimentation en mars 1995, seule la station de Chez-le-Bart a été maintenue en zone profonde, le dispositif précédent s'étant révélé extrêmement lourd à gérer.

4.4.2. Evolution des flux sédimentaires

L'évolution des flux sédimentaires totaux pour les stations de Chez-le-Bart, de Cortaillod et de Chevroux est présentée à la Figure 4.6. Seule la station de Cortaillod présente un enregistrement continu de mai 1992 à mars 1995, les mouillages des deux autres stations ayant été perdus chacun par deux fois. Les observations suivantes peuvent être faites; les flux totaux sont généralement plus élevés pour les stations situées sur les talus, et les flux sont également supérieurs à la station de Chevroux par rapport à celle de Cortaillod, excepté pour la période hivernale 1994-1995. Il faut toutefois préciser quelque peu ce schéma; si les flux estivaux et surtout automnaux sont clairement supérieurs sur les talus par rapport à la station de Chez-le-Bart, la différence s'amenuise en hiver et a même tendance à s'inverser au printemps (Fig.4.8. et Tab.4.4). D'autre part, les flux automnaux et hivernaux sont de manière générale plus élevés que les flux printaniers et estivaux (Fig.4.8. et Tab.4.4). Le fait que les flux soient généralement plus élevés à la station de Chevroux qu'à celle de Cortaillod ne reflète probablement pas un phénomène local, mais est à relier à des flux généralement plus élevés sur le tombant de la rive droite (SE) que sur celui de la rive gauche (NW). En effet, durant l'été et l'automne 92, la moyenne des flux à 30m s'élève pour le tombant NW à 8.55[g/m²*jour] et à 13.08[g/m²*jour] pour le tombant sud (2 stations pour chaque tombant). Les résultats de l'évolution des flux sédimentaires avec la profondeur sont présentés à la Figure 4.7. Les moyennes saisonnières sont présentées à la Figure 4.8. Les flux sont approximativement constants avec la profondeur durant l'été. Seule la station de Cortaillod présente des flux qui évoluent de manière particulière avec la profondeur, avec une diminution de 2-3[g/m²*jour] entre 10m à 30m en 1993 et en 1994. En automne, les flux augmentent généralement fortement avec la profondeur, dans un premier temps uniquement sur les tombants (p.ex. périodes 2.9.-13.10.93, 18.10.-7.11.94 et 7.11.-24.11.94, Fig.), puis dans un deuxième temps également à la station de Chez-le-Bart. Le schéma général de l'évolution des flux durant l'hiver est semblable à celui de l'automne, les flux hivernaux à la station de Chez-le-Bart étant cependant plus élevés que les flux automnaux, ce qui n'est pas le cas pour les tombants (Tab.4.4.). La station de Chevroux laisse apparaître une augmentation des flux avec la profondeur systématiquement plus forte que la station de Cortaillod (Figs.4.7. et 4.8.); d'autre part, les flux de Chevroux à 10m de profondeur sont de manière générale moins élevés qu'à Cortaillod. Le Tableau 4.4. présente les moyennes annuelles et saisonnières par station. L'observation majeure est qu'environ les 2/3 du sédiment sont récoltés durant l'automne et l'hiver, 1/3 durant le printemps et l'été.

	Chez-le-Bart (g/m ² *jour) (120m)	Cortaillod (g/m ² *j) (30m)	Chevroux (g/m ² *j) (30m)	Chez-le-Bart (g/cm ²)	Cortaillod (g/cm ²)	Chevroux (g/cm ²)
printemps (93+94)	3.99	3.76				
été (93+94)	3.03	3.66	5.99			
automne (93+94)	4.78	8.36				
hiver (92+93+94)	6.90	8.36				
Automne + Hiver (92-93)	7.36	7.04	13.84	0.134	0.129	0.253
Printemps + Eté (93)	2.81	3.96	4.85	0.051	0.072	0.089
Automne + Hiver (93-94)	5.91	10.33		0.108	0.189	
Printemps + Eté (94)	4.09	3.48		0.075	0.063	
Automne + Hiver (94-95)	5.42	8.27	7.02	0.099	0.151	0.128
Automne + Hiver (92-94)	6.23	8.55	10.43	0.114	0.156	0.190
Printemps + Eté (93-94)	3.45	3.72	4.85	0.063	0.068	0.089
Automne 92 - Eté 93	5.09	5.50	9.34	0.186	0.201	0.341
Automne 93 - Eté 94	4.36	7.15		0.183	0.252	
moyenne annuelle (92-95)	4.84	6.13	7.64	0.177	0.224	0.279
Pourcentage Aut.+Hiver(%)	64.3	69.7	68.3			
Pourcentage Print.+Eté(%)	35.7	30.3	31.7			

Tab.4.4. Moyennes saisonnières des flux totaux par station

4.4.3. Granulométrie du matériel récolté

Les résultats de l'étude granulométrique sont présentés à la Figure 4.9, ainsi qu'en Annexe 4.4. Peu de variations sont observables entre les pièges situés dans l'épilimnion et ceux situés dans l'hypolimnion; moyenne (mean) de 9.3µm à 10m, 9.5µm à 30m et 10.5µm dans l'hypolimnion. Seule une légère diminution des tailles dans la BNL est observée, aussi bien en été qu'en hiver, la moyenne (mean) étant de 7.5µm dans la BNL contre 9.8µm pour le reste de la colonne d'eau. Cette légère différence peut être attribuée à l'influence de remises en suspension de matériel fin à l'interface eau-sédiment.

De légères différences apparaissent également entre l'été et l'hiver; la proportion de particules de taille inférieure à 4µm est plus élevée en hiver alors que le contraire est valable pour les particules de taille comprise entre 8 et 31µm. Ceci est en outre confirmé par les analyses de Filippi et al. (in prep.; cf. paragraphe 4.4.11.; Fig.7). La combinaison de deux facteurs est susceptible d'expliquer ce fait; d'une part les argiles et limons très fins d'origine détritique sont plus abondants durant l'hiver (cf. 4.4.6.) et d'autre part, la resuspension étant plus active en hiver (cf. 4.4.9.), des particules fines sont susceptibles d'être redistribuées dans la colonne d'eau.

4.4.4. Texture du matériel récolté

La texture du matériel a été étudiée au microscope électronique à balayage (Institut de zoologie, Université de Neuchâtel).

La Figure 4.10. présente différents types de diatomées centriques et pennées (a,b,c et d), un test de *Phacotus sp.* - type d'algue verte qui sécrète un test carbonaté - (e), ainsi qu'un agrégat carbonaté (f). Ces agrégats sont apparemment composés de fines particules principalement carbonatées ainsi que parfois de diatomées centriques de petite taille (*Stephanodiscus sp.* et/ou *Chlorella sp.*), surtout au printemps comme sur cet exemple. Leur taille est généralement comprise entre 20 et 50µm.

La Figure 4.11. présente l'évolution générale de la texture du matériel récolté au cours d'un cycle annuel, dans le cas particulier celui de l'année 1993. Le matériel du début du printemps (15.3.-20.4.93)(a), est dominé par des diatomées, accompagnées de minéraux détritiques et de particules carbonatées en agrégats ou seules. Cette période correspond au premier développement phytoplanktonique important de l'année 93 (Fig.4.29.). La période suivante (20.4.-11.5.93)(b) est caractérisée par la présence prépondérante de calcites endogéniques aux formes équidimensionnelles (faciès rhomboédrique) accompagnées de diatomées proportionnellement moins nombreuses et de minéraux détritiques. La période du 16.6. au 2.7. (c) correspond au second développement phytoplanktonique important de l'année 93 (Fig.4.29.). Les diatomées abondent et sont accompagnées principalement de calcites endogéniques. La période tardi-estivale (29.7.-2.9.93)(d) est caractérisée par la présence de calcites endogéniques qui montrent des traces de dissolution, par une abondance plus faible de diatomées et par de nombreux tests de *Phacotus sp.* Changement de décor en automne (e) où tous les types de particules décrites précédemment se retrouvent; calcites aux formes équidimensionnelles, calcites montrant des signes de dissolution, tests de diatomées centriques et pennées, particules détritiques et agrégats carbonatés. Ce type d'association se maintient durant l'hiver avec toutefois une apparente augmentation de la proportion de particules d'origine détritique (f); le mélange des divers éléments présents au cours la période estivale indique l'influence de la resuspension.

La Figure 4.12. montre l'évolution des faciès des calcites endogéniques au cours de la saison. Durant la période du 20.4.-11.5., il y a prépondérance de calcites équidimensionnelles, de faciès rhomboédrique et de taille généralement comprise entre 8 et 16µm (a et b). Les calcites de la période du 16.6. au 2.7. présentent généralement un faciès moins équidimensionnel (c), avec des tailles équivalentes, voire légèrement inférieures à celles de la période avril-mai. Les calcites du mois d'août montrent des signes de dissolution et leurs tailles sont généralement comprises entre 4 et 8µm (d).

La différence de taille entre les calcites de la période du 20.4.-11.5 et celles de la période estivale est partiellement confirmée par l'analyse granulométrique, les particules de taille comprise entre 8 et 16µm étant moins abondantes en été (Fig.4.9.).

La présence de traces de dissolution dans le matériel du mois d'août est étonnante dans la mesure où les eaux de surface sont toujours sursaturées par rapport à la calcite (Fig.4.21.).

4.4.5. Estimation de la vitesse de sédimentation globale de la moyenne des particules

Les particules en suspension dans la colonne d'eau sont de taille, de forme et de composition très diverse. De ce fait, leur vitesse de sédimentation est susceptible de varier entre quelques millimètres et plusieurs mètres, voire plusieurs dizaines de mètres par jour. Nous nous proposons dans ce paragraphe d'évaluer une vitesse de sédimentation globale du matériel en suspension, vitesse qui n'aura pas de réalité pour les particules considérées individuellement mais qui donnera une idée de la dynamique du transfert des particules vers le fond. Dans la suite du propos et par souci de concision, nous nommerons cette estimation "vitesse de chute (ou de sédimentation) moyenne des particules".

La vitesse de sédimentation moyenne des particules [m/j] peut être estimée en divisant le flux sédimentaire [g/m²*jour] par la charge particulaire de l'eau [g/m³] à la profondeur considérée:

$$v_j = F / \text{MES} \text{ [m/j]} \quad (4-1)$$

où
F: flux sédimentaire à la profondeur z
MES: charge particulaire à la profondeur z

Cette mesure est imparfaite de par les différentes échelles de temps en cause (Eadie et al. 1990) et du fait des hétérogénéités de concentration en matière particulaire de la colonne d'eau. Il est cependant possible d'améliorer cette estimation en tenant compte des variations de concentration dans le temps et dans l'espace (Bloesch & Sturm 1986):

$$v_2 = F / (MES)_{p,t} \text{ [m/j]} \quad (4-2)$$

où F: flux sédimentaire à la profondeur z

$(ME5)_{p,t}$: charge particulaire moyenne de la colonne d'eau située au-dessus du piège durant le temps d'exposition du piège

Cette dernière méthode a été adoptée dans le cadre de notre étude. Les charges ont été mesurées à 10m et 30m aux stations situées sur les tombants et à 10, 30, 75 et 120m à la station de Chez-le-Bart, lors du relevé des pièges ainsi que parfois entretemps (cf. Annexe 3.5.). L'application de l'équation (4-2) postule que la matière en suspension récoltée et extraite par filtration est (1) représentative du matériel en cours de sédimentation et que (2) la concentration en particules ne soit pas trop hétérogène en fonction de la profondeur. La condition (1) est probablement loin d'être satisfaite en ce qui concerne l'épilimnion estival, où une grande partie des particules organiques sont recyclées. Il faut donc s'attendre à ce que l'équation (4-2) sous-estime plus ou moins fortement les vitesses de chute épilimniques estivales.

Les vitesses de chute épilimniques estivales à la station de Chez-le-Bart ont été estimées en postulant que les apports en provenance de resuspensions et les pertes par dissolution et minéralisation sont négligeables ou compensatoires, ce qui se base sur le fait que les flux sont constants entre 50m et le fond et que la composition du matériel ne varie guère en fonction de la profondeur durant la période estivale. On estime alors les vitesses de chute épilimniques en divisant les flux moyens estivaux par la charge particulaire estivale moyenne de l'épilimnion.

Les résultats sont présentés à la Figure 4.13, ainsi qu'au Tableau 4.5. Sur les tombants, les vitesses de chute épilimniques (10m de profondeur) égalent 3.43 ± 2.02 [m/j] en période stratifiée (avril-novembre) et 5.09 ± 3.57 [m/j] en période non stratifiée. Elles augmentent à 30m de profondeur pour atteindre respectivement 5.37 ± 3.07 [m/j] et 7.66 ± 5.06 [m/j]. Dans la zone profonde (station de Chez-le-Bart), les vitesses de chute épilimniques passent de 2.58 ± 1.11 [m/j] durant la période stratifiée à 3.37 ± 0.90 [m/j] pour la période non stratifiée. Les valeurs augmentent avec la profondeur et égalent respectivement 5.74 ± 2.58 [m/j] et 7.10 ± 3.13 [m/j] à 120m. A ces vitesses les temps de résidence des particules dans la colonne d'eau sont de l'ordre de 20 à 40 jours. Les vitesses élevées dans la BNL (>100m) y impliquent des temps de résidence inférieurs à une semaine (3-6 jours) et une recharge en particules plus importante que dans le reste de la colonne d'eau.

Profondeur (m)		MES (mg/l)	Vt [m/j]	Vp,t [m/j]	déviation standard
	TOMBANTS				
10	été (N=13)	1.44	3.43	3.43	2.02
30	été (N=12)	0.80	6.87	5.37	3.05
10	hiver (N=5)	1.18	5.09	5.09	3.57
30	hiver (N=5)	1.10	7.68	7.66	5.06
	PLAINE				
10	été (N=10)	1.46	2.58	2.58	1.11
30	été (N=10)	0.71	4.26	3.01	1.50
75	été (N=10)	0.48	6.50	4.44	1.41
120	été (N=10)	0.77	5.08	5.74	2.68
10	hiver (N=5)	0.82	3.37	3.37	0.90
30	hiver (N=5)	0.87	4.02	3.91	1.43
75	hiver (N=5)	0.83	4.64	4.49	1.67
120	hiver (N=5)	1.10	5.97	7.10	3.13

Tab.4.5. Vitesses de chute moyennes des particules;

Vt: calcul basé sur la moyenne de la charge en suspension en fonction du temps (équation 4-1);

Vp,t: calcul basé sur la moyenne de la charge en fonction du temps et de la profondeur (équation 4-2)

Discussion

Les résultats de la période non stratifiée sont compatibles avec ceux qui se réfèrent à des méthodes similaires sur d'autres lacs, notamment les lacs Michigan, Superior et Huron, où les vitesses de chute passent de environ 5m/j en surface à 8m/j dans l'hypolimnion (Eadie et al. 1990). Elles sont cependant d'un ordre de grandeur supérieur aux valeurs obtenues par Bloesch & Sturm [1986 #558] dans le lac de Zoug (0.1-0.76m/j).

Les valeurs épilimniques estivales (moyenne tombants + plaine: 3m/j) sont élevées par rapport aux résultats obtenus dans d'autres lacs: 0.52 ± 0.16 m/j pour les lacs Michigan, Superior et Huron (Eadie et al. 1990), 0.76m/j pour le lac Ontario (Rosa 1985), 0.55m/j pour le lac Erie (Charlton & Lean 1987), 0.28-1.32m/j pour le carbone organique particulaire dans le lac de Zoug (Bloesch & Sturm 1986), environ 0.75m/j pour le Greifensee (Lee et al. 1987). Des mesures in situ de vitesse de sédimentation ont été effectuées par Burns & Pashley (1974) dans le lac Ontario à l'aide de bouteilles d'échantillonnage spécialement conçues. Les résultats concernant le carbone organique particulaire dans l'épilimnion durant des conditions stratifiées varient entre -0.4 et +2.0m/j. Les valeurs hypolimniques estivales et hivernales obtenues dans le cas du lac de Neuchâtel (4-6m/j) sont mieux en accord avec celles obtenues de manière générale: 2-3m/j pour les lacs Michigan, Superior et Huron (Eadie et al. 1990), 4.0m/j pour le Greifensee (Lee et al. 1987), 0.51-1.25m/j pour le lac de Zoug (Bloesch & Sturm 1986).

Les vitesses de chute épilimniques estivales du lac de Neuchâtel paraissent élevées en regard des résultats obtenus dans d'autres lacs. Y aurait-il un recyclage moins important des particules épilimniques dans le lac de Neuchâtel que dans d'autres lacs? On peut également se demander si les vitesses relativement élevées obtenues ne sont pas dues à une sous-estimation des charges particulières. Lors de la campagne du 30 juin 1993 par exemple, des charges atteignant jusqu'à 10mg/l (75FTU) ont été mesurées et ont correspondu à une phase de précipitation de calcite (Fig.4.25.). Il faut toutefois imaginer que les particules en cause ont été évacuées rapidement car 12h plus tard la turbidité avait déjà retrouvé des valeurs normales à la station en cause (<2FTU). Plus généralement, les charges mesurées en été dans l'épilimnion montrent une variabilité relativement modeste; 1.27 ± 0.35 (mg/l). Peu d'arguments d'une sous-estimation des charges peuvent donc être invoqués. Il est cependant possible que lors de l'échantillonnage de l'eau, une partie des particules de grande taille et qui sédimentent rapidement soient sous-représentées. Une telle hypothèse a déjà été avancée, notamment par Eadie et al. (1984).

D'autres études, notamment des expérimentations à l'aide de pièges à intervalles, ont montré que la sédimentation qui est induite par de la précipitation de calcite ou par des blooms phytoplanctoniques s'accomplit très rapidement, en quelques jours seulement (Sturm et al. 1982). En ce qui concerne le lac de Neuchâtel, les vitesses de chute peuvent être estimées de manière indépendante, en considérant le temps d'exposition des pièges. La période du 20.4. au 11.5.93, par exemple, a été caractérisée par le début de la précipitation carbonatée saisonnière (cf. justification au paragraphe 4.4.8.). Durant cet intervalle de 20 jours, la majeure partie de la calcite produite dans l'épilimnion a atteint la zone profonde du lac, comme l'attestent les valeurs similaires des flux hypolimniques et épilimniques ainsi que la composition du matériel, à peine moins carbonatée à 120m (>70%) qu'en surface (80-90%) (Fig.4.7. + Annexe 4.6.). Les vitesses de chute estimées avoisinent 6m/j en postulant que toute la calcite a précipité en début de période, soit le 20 avril, ou encore 12m/j en postulant que la calcite a précipité au milieu de la période d'exposition des pièges. En utilisant une méthode similaire sur le lac de Zoug, Bloesch & Sturm (1986) obtiennent des vitesses de chute du même ordre de grandeur et postulent que les valeurs indiquées plus haut pour ce lac sont sous-estimées. Leurs conclusions sont de plus confirmées par les résultats de leurs pièges à intervalles.

Il est encore possible de comparer les vitesses moyennes que nous avons obtenues (5m/j en moyenne pour la station de Chez-le-Bart, hiver et été confondus) à celles prévues par la loi de Stokes:

$$u = \frac{1}{18} \frac{\rho_s - \rho_f}{\eta} g D^2 \quad (4-3)$$

où:

- u: vitesse de sédimentation; - ρ_s : densité des particules; - ρ_f : densité du fluide; η : viscosité du fluide (dans nos calculs: $T = 5^\circ\text{C}$); g: accélération; D: diamètre des particules

Nous avons donc calculé la vitesse de sédimentation moyenne des particules à partir du spectre granulométrique du matériel des pièges à sédiments (Annexe 4.4.) en considérant que les pièges intègrent toutes les particules qui sédimentent. Seules les moyennes des spectres granulométriques estivaux et hivernaux ont été considérées. La taille moyenne de chaque classe granulométrique a été prise en compte pour le calcul de D^2 , soit $0.75\mu\text{m}$ pour la classe 0.5-1 μm , $1.5\mu\text{m}$ pour la classe 1-2 μm et ainsi de suite. Deux calculs ont été effectués; le premier en considérant la densité des particules (ρ_s) comme égale à celle d'un sédiment standard (2.6g/cm^3), le second en la fixant arbitrairement à 2g/cm^3 .

Les résultats s'établissent respectivement à 8.8m/j et 2.1m/j pour la période non stratifiée et à 10.1m/j et 6.3m/j pour la période stratifiée. Ces estimations théoriques sont donc d'un ordre de grandeur tout à fait compatible avec les évaluations expérimentales établies d'après l'équation (4-2). A noter que ces calculs théoriques prévoient des vitesses de chute inférieures à 10cm/j pour les particules de la classe des argiles et supérieures à 100m/j pour les limons grossiers (>31 μm).

En conclusion, ces calculs de vitesse de chute des particules permettent d'avoir une idée de la dynamique "globale" de la sédimentation des particules qui forment la partie quantitativement importante du réservoir de matériel particulaire. Ces évaluations ne peuvent en aucun cas viser à obtenir des vitesses absolues.

Les valeurs obtenues suggèrent que la partie quantitativement majoritaire du réservoir de matériel particulaire est relativement rapidement évacuée de la colonne d'eau, en moyenne dans un laps de temps de l'ordre de quelques dizaines de jours.

4.4.6. Minéralogie du matériel récolté

Seules des analyses de sédiment total ont été effectuées. Le matériel récolté est en majeure partie constitué de carbonates, avec des teneurs en calcite qui oscillent entre 50 et 70% en hiver et entre 75 et 90% en été (Figs.4.14. et 4.15.). Les autres principaux minéraux présents sont les phyllosilicates, le quartz, les feldspaths potassiques et les plagioclases, l'ankérite et la dolomite. La station de Chevroux présente le plus fort taux de carbonates (Fig.4.15.). Quelle que soit la station ainsi que la saison considérée, le matériel récolté est plus carbonaté que le matériel en suspension des principaux affluents du lac.

Il a été possible d'estimer le pourcentage de calcite allochtone dans la calcite totale en comparant les rapports (Ankérite+Dolomite)/(Ankérite+Dolomite+Calcite) $((A+D)/(A+D+C))$ des principaux affluents du lac avec ceux du matériel des pièges de manière comparable à la procédure de Kelis (1978). Le calcul s'exprime comme suit:

$$CC_{\text{allo}} = 100(R2/R1)[(1-R1)/(1-R2)] \quad (4-4)$$

où CC_{allo} est le pourcentage de calcite allochtone par rapport à la totalité de calcite;

$R1$ représente le rapport $((A+D)/(A+D+C))$ moyen du matériel en suspension des principaux affluents du lac;

$R2$ est le rapport $((A+D)/(A+D+C))$ du matériel du piège à sédiments considéré.

A la Figure 4.16., les résultats (A) sont comparés au résidu insoluble (B). Les pourcentages de calcite allochtone estimés par cette méthode varient entre 5-10% en été et 20-50% en hiver. On observe une forte diminution de ces pourcentages en avril-mai 1993, ce qui d'après les mesures de la conductivité épilimnique et les analyses de calcium dissous correspond à la période d'initiation de la précipitation carbonatée (Figs.3.22. et 3.23.), puis une forte réaugmentation dès le début de l'automne, ce qui peut être interprété comme correspondant à l'arrêt ou à la forte diminution de la précipitation de calcite endogénique. Les pourcentages de résidu insoluble évoluent de manière concordante avec le pourcentage estimé de calcite allochtone. Le fait que les pourcentages de calcite allochtone soient légèrement supérieurs à Cortaillod par rapport aux autres stations alors que les pourcentages de résidu insoluble y sont légèrement inférieurs pourrait être dû à la proximité de l'embouchure de l'Arcuse, affluent dont le matériel en suspension possède la composition la plus carbonatée.

4.4.7. Géochimie du matériel récolté

Les analyses suivantes ont été effectuées; C, H et N élémentaires, carbone organique, isotopes stables de l'oxygène et du carbone sur carbonates totaux (Maria Letizia Filippi, Lausanne). Le carbone minéral est obtenu par différence ($C_{\text{tot}} - C_{\text{org}}$), le pourcentage de carbonates est normé à la calcite ($\text{Carb} = C_{\text{min}} * [100.08/12]$), et le résidu insoluble est également obtenu par différence ($R1 = 100 - \text{Carb} - [2 * C_{\text{org}}]$), le pourcentage de matière organique étant considéré comme égal au double du contenu en carbone organique. L'erreur de mesure absolue est estimée à $\pm 0.2\%$ pour le carbone total (erreur relative: $\pm 1.5\%$; cf. chapitre 2) et à $\pm 0.5\%$ pour le carbone organique (erreur relative: $\pm 7\%$; cf. chapitre 2); l'erreur absolue sur le pourcentage de carbonates peut donc être estimée à $\pm 5\%$. Les résultats in extenso peuvent être consultés en Annexe 4.8.

Les évolutions du pourcentage de carbonates et du pourcentage de carbone organique en fonction de la profondeur pour chaque période de mesure sont présentées respectivement aux Annexes 4.6. et 4.7. Les Figures 4.17. et 4.18. présentent respectivement les moyennes saisonnières de la teneur en carbonates et de la teneur en carbone organique. Les teneurs en carbonates qui passent de 30-70% en hiver à 70-90% en été (Annexe 4.6.). Il apparaît donc que les carbonates sont légèrement surdosés lors de l'analyse minéralogique. La teneur en carbonates est de manière générale plus élevée à la station de Chevroux, et ceci surtout à proximité du fond.

Des caractéristiques propres à chaque saison sont observables et peuvent être décrites de la manière suivante (Fig.4.19.):

- PRINTEMPS: au cours du printemps, il y a simplement passage d'une composition pauvre en carbonates et riche en carbone organique à une composition riche en carbonates et plus pauvre en carbone organique (Fig.4.19.A); cette évolution peut donc être interprétée comme un passage à la période de production carbonatée dans le lac.

- ETE: aux stations des tombants, la teneur en carbonates a tendance à diminuer avec la profondeur (Fig.4.19.B), ce qui est à mettre en relation avec l'augmentation des flux totaux, du moins à Chevroux, les flux n'augmentant pas avec la profondeur à Cortaillod. A Chez-le-Bart, les flux et la composition restent constants avec la profondeur.

- AUTOMNE et HIVER: le matériel est généralement plus carbonaté sur les tombants qu'à Chez-le-Bart (Fig.4.17.). En moyenne pondérée, la teneur en carbonates augmente avec la profondeur (Fig.4.17.), alors que le contenu en carbone organique diminue avec la profondeur (Fig.4.18.). La composition évolue en fait entre deux

situations extrêmes; une situation où la composition évolue peu avec la profondeur et qui correspond à des périodes où les flux sont non seulement généralement élevés mais montrent encore une augmentation avec la profondeur qui se maintient dans un rapport faible (Fig.4.19.C; exemple du 3.1.94); une situation où les flux et la composition évoluent avec la profondeur et qui correspond à des flux généralement faibles et dont l'augmentation avec la profondeur est d'un facteur élevé (Fig.4.19.C; exemple du 19.12.94).

Enfin, le rapport C/N du matériel récolté est compris entre 6 et 16 (Fig.4.20.). Une valeur de 5.2 a été obtenue pour un échantillon composé en majeure partie de phytoplancton alors que le matériel des affluents affiche des valeurs comprises entre 10 et 14 (paragraphe 4.2.3.). Les résultats des pièges sont en accord avec ce schéma; les valeurs élevées (>12) correspondent à des périodes où les flux sont faibles et le matériel faiblement carbonaté (40-60%), comportant donc une part importante de matériel détritique. La variabilité du rapport C/N est relativement faible au cours de l'année, avec une moyenne de 8.4 au printemps, 9.0 en été, 10.2 en automne et 9.2 en hiver. Les moyennes par station varient également faiblement avec 9.7 pour Cortaillod, station la plus marquée par les apports allochtones, 9.1 pour Chevroux et 9.5 pour Chez-le-Bart. La matière organique subit probablement une forte modification de sa composition par dégradation au sein des pièges, le rapport C/N du matériel des pièges étant nettement plus élevé que celui du phytoplancton. Il est également probable que l'influence de la resuspension entraîne une augmentation du rapport C/N, les sédiments de surface présentent en effet des rapports C/N de l'ordre de 10.

4.4.8. Etude de la précipitation de la calcite

La précipitation de la calcite en milieu lacustre est un phénomène observé à l'échelle mondiale. Les petits cristaux de calcite formés représentent une large surface de réaction et sont de ce fait susceptibles d'affecter les concentrations de diverses substances dissoutes par adsorption et co-cristallisation.

La calcite est le seul carbonate dont nous avons reconnu la précipitation dans le lac de Neuchâtel. La vaterite, et les oxalates de calcium détectés par Bapst (1987) n'ont pas été retrouvés lors de nos analyses. La possibilité d'une synthèse de ces composés lors du traitement des échantillons à l'eau oxygénée peut éventuellement être avancée (Rueh, comm. pers.) mais nous n'avons pas testé cette possibilité.

La condition pour qu'une précipitation de calcite ait lieu est définie thermodynamiquement par la relation (Kelts & Hsü 1978):



où (Ca^{2+}) et (CO_3^{2-}) sont les activités ioniques de ces ions à l'équilibre et K_c la constante d'équilibre qui est à pression constante uniquement fonction de la température. La condition pour qu'il y ait sursaturation est donnée par:

$\text{IAP} > K_c$, IAP étant le produit des activités ioniques $(\text{Ca}^{2+})(\text{CO}_3^{2-})$

L'activité ionique du ion CO_3^{2-} étant rarement obtenue par des mesures directes, sa valeur doit être calculée sur la base de la relation d'équilibre avec les ions bicarbonate. A noter que pour les valeurs de pH rencontrées dans le lac de Neuchâtel (7.8-8.6), la quasi-totalité du carbone inorganique en solution se trouve sous la forme de HCO_3^- .

Différentes recherches (p.ex. Brunskill, 1969) ont montré que la précipitation et la dissolution de la calcite sont en partie gouvernées par des mécanismes cinétiques, le fait qu'il y ait sursaturation n'impliquant donc pas forcément précipitation. Certains auteurs ont discuté l'importance potentielle de la nucléation hétérogène en tant que catalyseur de la nucléation (De Boer 1977), alors que d'autres ont conclu à une influence de certaines espèces de diatomées, ayant notamment observé l'incorporation de frustules de *Stephanodiscus sp.* et/ou de *Chlorella sp.* dans les calcites, ainsi qu'une concordance temporelle entre précipitation de calcite et le développement de ces espèces (Stabel 1985; Stabel 1986; Küchler-Krischun & Kleiner 1990). Il est par ailleurs clair que l'activité phytoplanctonique a un effet direct sur le degré de saturation, en consommant de grandes quantités de CO_2 , augmentant le pH et déplaçant les équilibres des carbonates. Il a également été montré que le mélange de deux masses d'eau aux pH différents peut mener à la sursaturation (Wigley & Plummer 1976). D'autre part, la présence de certaines substances dissoutes peut inhiber la précipitation: magnésium, phosphore, composés organiques (Folk 1974; House 1987).

L'étude des processus qui gouvernent la précipitation de la calcite n'est pas au centre de notre recherche. Toutefois, certaines questions sont apparues eu égard aux résultats de l'expérimentation par pièges à sédiments. Ceux-ci indiquent une proportion de calcite supérieure en toute saison à celle des principaux affluents du lac (Fig.4.15.). D'autre part, les flux sédimentaires totaux ainsi que les flux de carbonates sont plus élevés sur les tombants que dans la zone profonde (Chez-le-Bart) durant la période estivale (Figs.4.8. et 4.22., Annexe 4.8.). Les questions qui se posent sont donc les suivantes:

- quelle est la période de l'année durant laquelle la calcite précipite?
- la précipitation est-elle plus élevée sur les tombants que dans les bassins?
- quelles sont les conditions qui président à la formation de calcite, les eaux sont-elles sursaturées, y a-t-il influence de l'activité phytoplanctonique en tant que catalyseur de la nucléation, etc.?

La première interrogation qui nous occupera est celle de l'étendue de la période de précipitation de la calcite. Plusieurs méthodes nous permettent d'apporter une tentative de réponse à cette question:

- calcul des indices de saturation de la calcite, mesures de la conductivité, de l'alcalinité et de la concentration en calcium dissous des eaux du lac

Chapitre 4: Sédimentation actuelle

- minéralogie et géochimie du matériel des pièges
- analyse des isotopes stables de l'oxygène des carbonates récoltés dans les pièges à sédiments

Les indices de saturation de la calcite sont présentés à la Figure 4.21. Un quotient entre produit des activités ioniques et constante d'équilibre positif indique une sursaturation, un quotient négatif indique une situation de sous-saturation. Les eaux du lac de Neuchâtel sont donc en situation de sursaturation quasi permanente, les seules périodes de sous-saturation ayant été limitées à la couche néphéloïde benthique durant les mois de juillet-août 1992 et juillet 1993. Les fortes sursaturations épilimniques saisonnières présentent un développement similaire d'une année à l'autre, leurs maximas (>8) s'étendent de mai à août, voire septembre en 1993.

Les analyses minéralogiques et géochimiques du matériel récolté dans les pièges, les mesures de conductivité ainsi que les analyses d'alcalinité et de calcium dissous donnent de bonnes indications quant à la période ainsi qu'à l'étendue de la précipitation de calcite; contrairement à l'alcalinité et à la concentration en calcium dissous, la conductivité n'est pas une mesure qui reflète uniquement la concentration des ions qui participent à la précipitation de calcite. Cependant, étant donné que carbonates et calcium dissous participent de manière fortement majoritaire à la conductivité totale (cf. Annexe 3.4.) et que les autres ions en solution ne sont sujets qu'à de faibles variations absolues de leur concentration, la variation de la conductivité peut être considérée comme le reflet des variations de concentration des carbonates et du calcium.

- printemps 1992: d'après les mesures de conductivité électrique, il est possible d'affirmer que la précipitation de calcite avait déjà débuté le 10 juin 1992 (Figs.3.20. et 3.21.).

- printemps 1993: toujours d'après les mesures de conductivité électrique, la précipitation de calcite a débuté entre le 14 et le 21 avril. Ceci ne se reflète dans les analyses du calcium dissous qu'à partir du milieu du mois de mai avec une diminution épilimnique d'environ 2mg/l (Annexe 3.4. + Fig.3.22.). Ces résultats sont confirmés par la minéralogie et la géochimie du matériel récolté au printemps 1993; durant la période du 20.4. au 11.5.93, le matériel devient brusquement plus riche en calcite et moins riche en minéraux détritiques (Figs.4.14. et 4.16.). Dans le même temps, le résidu insoluble passe d'environ 40% à moins de 20%.

- printemps 1994: le 26 avril 1994, la conductivité est encore constante sur la totalité de la colonne d'eau. La conductivité épilimnique commence à diminuer en mai, mais la diminution reste plus faible que l'année précédente au moins jusqu'à fin juin (Fig.3.21.). Les résultats des analyses de concentration en calcium dissous confirment que la précipitation a été faible jusqu'au milieu du mois de juin, les teneurs épilimniques n'étant que d'environ 1mg/l inférieures à celles de l'hypolimnion le 22.6.94 (Annexe 3.4. + Fig.3.22.).

La cause de la faible précipitation printanière observée en 1994 par rapport à l'année précédente est probablement à relier à la plus faible production phytoplanktonique observée en 1994 (cf. Tab.3.2.).

Si le début de la période de précipitation est relativement aisé à déterminer, l'origine de la calcite automnale et hivernale est plus difficile à cerner: l'affaiblissement de la stratification thermique provoque une uniformisation verticale des valeurs de la conductivité, de la concentration en calcium et de l'alcalinité (Figs.3.20. et 3.22.), phénomène qui est susceptible de masquer une précipitation de calcite.

D'après les résultats minéralogiques et géochimiques, on est tenté de postuler que la précipitation cesse ou diminue fortement durant la période du 2 septembre au 13 octobre en 1993, les pourcentages estimés de calcite allochtone (calculés pour 1993 seulement) et de résidu insoluble retrouvant leurs valeurs hivernales lors de ces deux périodes. Les analyses des isotopes stables de l'oxygène nous ont permis de tester cette hypothèse. La température théorique de l'eau lors de la cristallisation de la calcite a été recalculée par Maria Letizia Filippi d'après les équations de O'Neil et al. (1969), modifiées par Friedman & O'Neil (1977) et la valeur obtenue comparée à celle de la température épilimnique moyenne de la période d'exposition des pièges. Les résultats (Filippi et al., 1998, Fig.6) laissent apparaître une température de l'eau lors de la cristallisation de 3 à 10°C supérieure à celle mesurée (cf. également Fig.4.23.), et ceci pour les deux périodes hivernales 1992-93 et 1993-94. Si de telles différences de température ont été interprétées en termes de précipitation en déséquilibre de la calcite pour la période du 20.4. au 11.5.93 (cf. 4.4.11.), cette interprétation ne peut s'appliquer à la période hivernale. En effet, la resuspension domine durant cette période (cf. 4.4.9.) et la physico-chimie de l'eau indique l'absence de précipitation notable (pas de diminutions de la concentration en calcium dissous, de l'alcalinité ni de la conductivité, faibles sursaturations). La calcite hivernale est donc constituée d'un mélange de calcite allochtone et de calcite endogénique estivale. En ce qui concerne la période du 2.9. au 13.10.93, il peut s'agir aussi bien de calcite précipitée durant la période que d'un mélange de calcite allochtone et de calcite endogénique ayant précipité lors des périodes précédentes, l'analyse des isotopes stables ne permettant pas de trancher de manière claire.

Il nous a paru intéressant de tenter de comparer les flux carbonatés avec une estimation de la quantité de calcite précipitée pour chaque période d'exposition des pièges. Cette estimation a été obtenue à partir des mesures de la conductivité. Le calcul s'exprime de la manière suivante:

$$- C_{ct} = [(C_h - C_e) * (1/p) * (PM_{CaCO_3}/PM_{Ca})] * Z \quad (4-5)$$

où:

- C_{ct} : quantité de calcite précipitée depuis le début du printemps jusqu'à la période de retrait des pièges considérée [g/m²]
- C_h : Conductivité hypolimnique moyenne lors du retrait des pièges ($\mu S/cm$)
- C_e : Conductivité épilimnique moyenne lors du retrait des pièges ($\mu S/cm$)
- p : pente de la droite de régression liant la conductivité à la concentration en calcium (Fig.4.22.A)
- Z : épaisseur de l'épilimnion [m]

Cette estimation est grossière pour les raisons exposées ci-après. Tout d'abord, elle postule que la variation de la conductivité épilimnique est entièrement due à la précipitation de calcite, ce qui est une approximation acceptable, mais qui ne tient pas compte d'autres processus susceptibles de modifier légèrement la conductivité comme par exemple la dégradation de la matière organique. En second lieu, les apports de calcium au lac durant l'été sont négligés. Bien que les affluents du lac de Neuchâtel soient en étiage durant l'été, ces apports sont bien réels et introduisent une sous-estimation dans notre calcul.

Une fois le paramètre C_{Cl} connu, il est possible d'estimer le flux de calcite précipitée pour chaque période d'exposition des pièges. Ce flux théorique peut ensuite être comparé avec les flux carbonatés mesurés à la base de l'épilimnion (30m pour les tombants, 50m pour Chez-le-Bart). Le résultat de cette comparaison est présenté à la Figure 4.23. Il appelle plusieurs commentaires; premièrement, la validité de l'estimation de la précipitation de calcite peut être appréciée en comparant les résultats obtenus avec des estimations indépendantes, réalisées à partir des données de concentration en calcium dissous (nos données) ainsi que de l'alcalinité (données du SCPE), en postulant qu'à chaque diminution d'une millimole de calcium ou d'alcalinité correspond la précipitation d'une millimole de calcite. Le désavantage de cette méthode réside dans le fait que nous ne disposons pas de mesures en continu sur la colonne d'eau. Un rapide calcul de la moyenne saisonnière des flux de calcite basé sur nos données de concentration en calcium dissous et les données d'alcalinité du Service cantonal neuchâtelois de la protection de l'environnement (SCPE) et sur une profondeur de l'épilimnion estimée égale à 15m montre toutefois un relativement bon accord entre les différentes méthodes de calcul (Fig.4.23.A). Concernant la période estivale, si les flux carbonatés mesurés aux stations de Chez-le-Bart et de Cortaillod sont proches des flux de calcite calculés (Fig.4.23.B et C), les flux carbonatés de la station de Chevroix sont nettement plus élevés que les flux calculés (Fig.4.23.D). D'autre part, les flux carbonatés hivernaux sont supérieurs aux flux estivaux concernant les stations des tombants et pratiquement aussi élevés que les flux estivaux pour la station de Chez-le-Bart.

Ces comparaisons ne tiennent pas compte des carbonates allochtones. En nous basant sur les estimations du pourcentage de calcite allochtone, nous avons déduit les montants obtenus. Les résultats présentés à la Figure 4.24.A pour la station de Cortaillod ne diffèrent que peu du schéma incluant les carbonates allochtones; les flux de la période hivernale restent supérieurs à ceux de la période estivale. D'autre part, si la différence entre température mesurée de l'eau et température recalculée d'après les valeurs des isotopes de l'oxygène (Filippi et al.; Fig.6; cf. article annexé à la fin de ce volume) est voisine de zéro durant la période estivale (Fig.4.24.A2), excepté en avril-mai, cette différence de température est élevée durant la période hivernale. Il apparaît donc que la calcite récoltée en hiver a précipité durant l'été et est remise en suspension durant l'hiver.

Pour revenir aux facteurs qui influencent la précipitation de la calcite, il apparaît d'après les indices de saturation (Fig.4.21.) qu'une sursaturation élevée est une condition nécessaire mais pas nécessairement suffisante pour qu'il y ait effectivement précipitation. En effet, durant certaines périodes de l'été, la précipitation effective peut être faible alors que la sursaturation est élevée. Un exemple qui illustre ce fait est la période du 24.5. au 1.6.94, période durant laquelle la précipitation a été très faible, voire nulle (Fig.4.23.), alors que l'indice épilimnique de saturation de la calcite était supérieur à 8. En fait nos résultats semblent indiquer que la précipitation est activée lors des périodes de relativement forte productivité phytoplanctonique et qu'elle est plus faible lors des phases d'eaux claires. On constate en effet que les flux carbonatés de la station de Cortaillod ont été minimaux lors de la phase d'eaux claires principale qui, lors des trois années étudiées, s'est située de fin mai à début juin (Fig.4.24B). L'espacement généralement de l'ordre d'un mois entre chaque relevé des pièges ne permet cependant pas de tirer des conclusions plus précises. Il est toutefois probable que la précipitation plus importante lors des périodes de forte production phytoplanctonique soit due à la combinaison d'une nucléation hétérogène facilitée et d'une augmentation passagère de la sursaturation par consommation du CO_2 . L'incorporation de frustules de diatomées n'a pas été observée lors de l'examination au microscope électronique à balayage. L'influence de l'augmentation de la température épilimnique en été n'est apparemment pas négligeable non plus. La précipitation de calcite est restée élevée durant le mois d'août en 1993 ainsi qu'en 1994, alors que la concentration en chlorophylle est restée relativement faible, avoisinant $2.5\mu g/l$ en août 1993 et seulement $1.5\mu g/l$ en 1994.

Il est à noter que nous avons observé à une seule reprise une précipitation de calcite in situ, le 30 juin 1993, devant Grandson (station INTE025). Le maxima de la précipitation a apparemment eu lieu vers 5m de profondeur avec des valeurs de turbidité qui ont atteint 70FTU, la charge en suspension s'élevant à $10mg/l$ (Fig.4.25.). La concentration en chlorophylle a montré des valeurs relativement modestes lors de cette campagne, de l'ordre de $2\mu g/l$, les analyses de biomasse révélant la présence de nombreuses diatomées du type *Fragilaria crotonensis* (Annexe 3.3.), diatomées qui n'ont pas été retrouvées incrustées de calcite endogène.

4.4.9. Etude de la remise en suspension de sédiment

4.4.9.1. Introduction

Ce paragraphe présente les processus de remise en suspension de sédiment et de transport des particules. L'importance de ces processus pour le lac de Neuchâtel est évaluée.

La remise en suspension des particules est le résultat des forces de cisaillement à l'interface eau-sédiment, elles-mêmes conséquences des courants de fond. Elle joue un rôle d'autant plus considérable que le bassin est peu profond (Hilton 1985) et que le lac subit régulièrement une homogénéisation complète. La remise en suspension affecte de manière préférentielle les zones littorales où les sédiments récents sont susceptibles d'être érodés dans

leur totalité. Les flux sédimentaires mesurés par expérimentation par pièges peuvent être extrêmement élevés dans ces zones (Bloesch & Uehlinger 1986). La remise en suspension peut également affecter les zones profondes des lacs, notamment si ceux-ci présentent une homogénéisation saisonnière, comme les grands lacs américains (Chambers & Eadie 1981; Eadie et al. 1990). Dans les lacs méromictiques ou durant la saison stratifiée dans l'hypolimnion d'un lac holomictique, les courants de fond susceptibles de remettre en suspension le sédiment sont principalement la conséquence des ondes internes générées au niveau de la pycnocline. Lemmin & Imboden (1987) proposent des courants de fond minimaux de l'ordre de 6cm/s pour remettre en suspension le sédiment, alors que Gloor et al. (1993) postulent qu'une vitesse de 3cm/s serait suffisante pour remettre en suspension les fines particules organiques. Le transport des particules remises en suspension au sein de la colonne d'eau a lieu sous l'action du courant, de la diffusion turbulente et de leur poids. Le coefficient horizontal de la diffusion turbulente est élevé (ordre de grandeur: 1000cm²/s), généralement de plusieurs ordres de grandeur plus élevé que le coefficient de diffusion verticale. Les particules remises en suspension sur les pentes seront donc réinjectées latéralement (ou obliquement) dans la colonne d'eau. Au fond du bassin lacustre, la surface élevée de l'interface eau-sédiment en regard du volume d'eau mène à la formation d'une couche néphéloïde benthique ou BNL ("Benthic Nepheloid Layer"). Le transfert des particules en direction de la surface ne se fait que par l'intermédiaire de la diffusion verticale en période stratifiée avec des coefficients faibles, généralement inférieurs à 1cm/s, alors qu'en période non stratifiée des phénomènes de convection affectant la totalité de la colonne d'eau peuvent grandement faciliter le transport des particules vers la surface. Il devient alors très difficile, en période non stratifiée, de distinguer les apports latéraux d'éventuels apports verticaux depuis le fond.

L'effet direct de la remise en suspension est une augmentation du taux d'accumulation de la périphérie vers le centre du bassin. Pour caractériser cet effet "entonnoir" nous utiliserons le terme anglais "focusing" dans la suite de notre propos.

A côté du processus relativement régulier ou tout au moins saisonnier de remise en suspension décrit ci-dessus, d'autres formes de transports plus épisodiques et énergétiques existent et mènent à des transports latéraux de matériel, que ce soit en overflow, en interflow ou en underflow. Un premier type consiste en l'interstratification du panache d'un affluent. La profondeur de l'interstratification est alors dépendante de la densité relative de l'eau de la rivière par rapport à celle du lac. Ce type de phénomène concerne avant tout les lacs qui sont reliés à un ou plusieurs affluents importants, et a été décrit notamment pour le lac Léman (Giovannoli & Lambert 1985; Giovannoli 1990) ou le lac de Brienz (Sturm & Matter 1978). Un second type est le courant de gravité, provenant d'un glissement de terrain subaquatique ou subaérien. La suspension plonge au fond du lac du fait d'une densité supérieure à celle de l'eau du lac.

Comme nous le verrons, les processus observés et décrits dans le lac de Neuchâtel au cours de cette étude ne concernent pas ou très rarement ces phénomènes épisodiques. Dans la suite de notre propos, quand nous parlons de remise en suspension de sédiment, il s'agit donc essentiellement du processus régulier et peu énergétique de resuspension et de transport par advection ou diffusion au sein de la colonne d'eau.

Dans le lac de Neuchâtel, la composition isotopique ($\delta^{18}\text{O}$) des carbonates récoltés durant la période hivernale démontre que ces carbonates se composent en majeure partie de calcite précipitée durant l'été. Un simple calcul de bilan démontre qu'il ne peut s'agir d'une sédimentation lente de la calcite estivale; en effet, si d'après la diminution de la conductivité épilimnique, la précipitation estimée de calcite a atteint 310g/m² durant la période estivale 1993 (2.2[g/m²*j] * 141 jours; Fig.4.22.A), les flux carbonatés enregistrés par les pièges à sédiments d'avril 1993 à avril 1994 s'élèvent à 584g/m² à Chez-le-Bart, 1323g/m² à Cortaillod et 1503g/m² à Chevroux. La part allochtone du flux carbonaté ne peut expliquer cette différence. De plus, les estimations des vitesses de chute des particules durant la période stratifiée (2.58±1,11 à 5,74±2,58[m/j] à la station de Chez-le-Bart) parlent également en défaveur d'une sédimentation lente de la calcite endogénique estivale.

La différence entre les flux des tombants et ceux de la station de Chez-le-Bart serait donc attribuable à une influence de la resuspension plus importante sur les tombants. Comme l'indique Bloesch (1982; 1986), cette hypothèse peut être testée en vérifiant si la production phytoplanktonique diffère ou non dans ces deux zones. Si nous comparons la teneur épilimnique en chlorophylle-a des stations de Cortaillod et de Chez-le-Bart pour l'année 1994 (Tab.3.4.), il apparaît que la différence moyenne d'environ 20% est en grande partie imputable à la période printanière de barre thermique, période durant laquelle les flux ne varient guère d'une station à l'autre. La conductivité et la température ne montrent pas non plus de variations sensibles entre les stations des tombants et celles de la zone profonde, hormis celles attribuables à des phénomènes hydrodynamiques temporaires. Il n'y a donc aucune indication d'une production de calcite plus importante sur les tombants et les flux carbonatés plus élevés dans ces zones sont attribuables à l'influence de la resuspension.

En ce qui concerne les moyennes saisonnières des charges en suspension (Tab.4.6.), les seules variations supérieures à 10% entre tombants et plaine se limitent à l'hiver et à l'automne à 30m de profondeur, périodes où les flux diffèrent également le plus. Si on considère les moyennes saisonnières du contenu en carbone organique du matériel récolté dans les pièges (Fig.4.18.), on remarque que la teneur est plus faible sur les tombants durant ces mêmes périodes. Ces diverses observations indiquent que les flux plus élevés sur les tombants sont principalement dus à une influence plus marquée de la resuspension.

profondeur et saison	MES (mg/l) Cortailod	MES (mg/l) Chevroux	MES (mg/l) Chez-le-Bart	différence (%) tombants-plaine
10m été	1.39	1.48	1.56	-8.3
30m été	0.64	0.64	0.66	-3.1
75m été			0.46	
120m été			0.52	
10m automne	1.15	1.14	1.07	6.5
30m automne	0.83	0.82	0.74	11.9
75m automne			0.38	
120m automne			0.53	
10m hiver	1.14	1.17	0.83	38.7
30m hiver	1.08	1.09	0.87	24.6
75m hiver			0.85	
120m hiver			1.08	
10m printemps	1.03		0.97	6.2
30m printemps	0.79		0.73	8.0
75m printemps			0.62	
120m printemps			0.87	

Tab.4.6. Moyennes saisonnières des charges en suspension par station et par profondeur; différence tombants-plaine (en %)

Ceci étant dit, plusieurs questions méritent d'être posées:

- quel est le schéma général de la resuspension? Quand et où a-t-elle lieu et avec quelle intensité? Comment se caractérise sa relation avec le vent?
- comment le sédiment remis en suspension est-il transporté?
- y a-t-il une relation entre l'état de la stratification thermique et la resuspension?

4.4.9.2. Relation entre les flux sédimentaires et l'intensité des vents

Si l'on compare les flux totaux avec l'intensité des vents, on s'aperçoit qu'il y a concordance temporelle entre les périodes de tempêtes et les périodes de flux maximaux (Fig.4.26.). Les périodes du 3.12.93-3.1.94 et du 19.12.94-31.1.95 constituent à la fois les périodes les plus ventées et les périodes comportant les flux maximaux, et ceci aussi bien à la station de Cortailod qu'à celle de Chez-le-Bart.

On remarquera toutefois que le printemps comporte généralement les flux les plus faibles, surtout sur les tombants, alors que cette période peut être relativement ventée, la période mars-avril 1994 en particulier.

Quelle est la relation entre les flux et l'intensité du vent ainsi que le débit des rivières?

Sur la Figure 4.27., nous avons comparé: en A) les flux totaux (à 120m à Chez-le-Bart et à 30m sur les tombants) avec la distance moyenne journalière parcourue par les vents d'intensité supérieure à 2m/s en moyenne journalière; en B) les flux totaux avec la distance journalière maximale parcourue par les vents durant la période considérée; en C) les flux totaux avec le nombre de jours où le vent a dépassé 5m/s en moyenne journalière. Il existe dans les trois cas une faible tendance à la corrélation positive entre les flux totaux et l'intensité du vent. Les coefficients de corrélation sont toutefois faibles.

En Fig.4.27.D), les flux totaux sont comparés au débit de l'Areuse, en considérant qu'il s'agit d'un des affluents principaux du lac en terme de débit solide; en E) les flux détritiques sont considérés alors qu'en F) ces mêmes flux détritiques sont comparés au débit maximal qu'a connu la rivière durant la période considérée. Dans les trois cas, les coefficients de corrélation sont trop faibles pour qu'il soit possible d'en tirer des conclusions.

Les évolutions saisonnières des flux totaux en fonction des distances moyennes parcourues par les vents sont présentées à la Figure 4.28. Seuls les vents d'intensité supérieure à 2m/s sont considérés. Le printemps et l'été se distinguent par une évolution des flux indépendante de l'intensité des vents, alors que les flux augmentent fortement en fonction du vent en automne et en hiver. La période automnale se distingue quant à elle par une augmentation des flux en fonction de l'intensité du vent plus forte sur les tombants qu'à la station de Chez-le-Bart. Les mêmes tendances sont obtenues en comparant les flux totaux avec la distance journalière maximale parcourue par les vents durant la période considérée et avec le nombre de jours où le vent a dépassé 5m/s en moyenne journalière.

Il paraît simpliste de vouloir relier directement l'évolution de la resuspension avec l'intensité du vent; le couplage entre les deux paramètres étant indirect, il est plus compliqué à appréhender. Certaines conclusions peuvent tout de même être tirées de cette comparaison; premièrement, il existe apparemment une variabilité saisonnière de la resuspension et celle-ci semble de plus forte intensité sur les tombants que dans la zone profonde. En outre, on

Chapitre 4: Sédimentation actuelle

obtient une tendance à la corrélation positive aussi bien entre les flux totaux et les kilomètres parcourus par les vents supérieurs à 2m/s en moyenne journalière qu'avec la distance journalière maximale parcourue durant la période considérée ou qu'avec le nombre de jours où le vent a dépassé 5m/s en moyenne journalière. Il semble donc y avoir une importance des vents de forte intensité sans qu'ils soient totalement déterminants. Il est à noter que Bengtsson et al. (1990) ont observé dans des lacs suédois de taille moyenne un taux de déposition dépendant du vent maximal et du nombre de tempêtes durant la période d'exposition des pièges.

4.4.9.3. Evolution de la composition du matériel récolté et influence de la resuspension

D'après les résultats présentés, il semblerait que les périodes de resuspension se situent principalement en automne et en hiver.

Plusieurs indications parlent en effet en faveur d'une domination de la resuspension lors des périodes automnale et hivernale: flux élevés, correspondance des flux élevés avec les périodes ventées, présence de calcite endogénique estivale, texture du sédiment, etc.

La Figure 4.29. présente une comparaison entre les périodes de production planctonique révélées par la concentration en chlorophylle-a (moyenne sur 3 stations; cf. Fig.3.14.) et les flux sédimentaires de carbone organique à la station de Chez-le-Bart. La situation de quasi-opposition temporelle observée entre les valeurs des deux mesures est également attribuable à une influence de remises en suspension durant l'hiver.

L'évolution saisonnière de la composition du matériel récolté apporte des arguments supplémentaires en faveur de l'hypothèse d'une forte influence de la resuspension en automne et en hiver (Figs.4.30., 4.31. et 4.32.).

- PRINTEMPS: deux situations apparaissent: en début de printemps, une teneur faible en carbonates, nettement inférieure à celle du sédiment, et en fin de printemps une teneur en carbonates supérieure à celle du sédiment, ce qui marque le début de la précipitation de calcite endogénique. La teneur en carbone organique diminue avec l'augmentation du flux total sans apparemment tendre asymptotiquement vers une composition moyenne du sédiment (Fig.4.30.A). Sa diminution de tendance linéaire en fonction du contenu en carbonates (Fig.4.30.B) indique que le carbone organique est simplement dilué par la précipitation de calcite. De même, l'évolution de la teneur en carbonates en fonction du flux total (Fig.4.30.C) indique le passage d'une composition détritique allochtone à une composition carbonatée autochtone sans influence perceptible de la resuspension. Aucune différence sensible de composition n'est perceptible d'une station à l'autre (Figs.4.31. et 4.32.).

- ETE: la teneur en carbonates du matériel récolté est toujours supérieure à celle du sédiment (Fig.4.30.C). Aux stations de Cortailod et de Chevroux, les teneurs en carbonates et en carbone organique montrent une faible tendance à la relation négative avec le flux total (Figs.4.31. et 4.32.), et la composition du matériel tend vers une composition du sédiment de surface de la station considérée avec l'augmentation du flux total. Une influence de resuspensions locales est donc probable sur les tombants. La Figure 4.19. confirme cette hypothèse dans la mesure où la composition du matériel devient moins carbonatée à proximité du fond. Aucune influence de la resuspension n'est par contre perceptible à la station de Chez-le-Bart.

- AUTOMNE et HIVER: Pour les 3 stations étudiées, la teneur en carbone organique tend asymptotiquement vers celle du sédiment avec l'augmentation du flux total. Ceci est valable de manière quelque peu moins évidente concernant l'hiver. De telles évolutions ont été observées dans le lac Erie (Charlton & Lean 1987) et ont été également attribuées à l'influence de la resuspension. Les teneurs en carbonates de l'automne et de l'hiver s'approchent également de celle du sédiment avec l'augmentation du flux total (Figs.4.30. et 4.32.). En début d'automne la teneur en carbonates peut toutefois être supérieure à celle du sédiment ce qui peut s'expliquer par une poursuite de la précipitation de calcite ou par des apports latéraux plus carbonatés en provenance du plateau lacustre.

Remarquez que la teneur en carbonates atteint des valeurs différentes selon les stations avec l'augmentation du flux total. Elles sont les plus élevées à Chevroux et les plus faibles à Chez-le-Bart. La composition du sédiment pour ces différentes stations respectent cette même hiérarchie. Ceci nous amène à postuler que le matériel remis en suspension est d'origine essentiellement locale. La contribution des zones de baignée peu profonde n'est donc pas nécessairement importante.

L'influence de la resuspension sur l'évolution de la composition du matériel est donc sensible avant tout en automne et en hiver. Cependant, les moyennes des flux carbonatés estivaux, parfois nettement supérieurs aux flux estimés d'après la conductivité électrique ou d'après l'évolution de la chimie de l'eau, et ce avant tout à Chevroux mais aussi à Cortailod en 1992 (Figs.4.22, 4.23. et 4.24.), laissent à penser qu'une partie du matériel récolté durant l'été provient de resuspensions, du moins sur les tombants. A cet égard, la diminution de la teneur en carbonates avec l'augmentation de la profondeur, qui s'observe en parallèle avec l'augmentation du flux total en fonction de la profondeur (Fig.4.19.B) est un argument supplémentaire.

4.4.9.4. La resuspension et le transport des particules étudiés à l'aide de la mesure de la turbidité

Cette étude a été entreprise en vue de mieux comprendre les mécanismes de resuspension, notamment la façon dont les particules sont transportées, s'il est possible de déterminer une influence de la stratification thermique et s'il est possible de tirer des conclusions sur l'hydrodynamisme.

En ce qui concerne la période hivernale, la relation entre turbidité et charge totale se base sur les résultats présentés au chapitre 3.8. (Figs.3.30. et 3.31.).

Le premier profil présenté (Fig.4.33.) reflète une situation tardi-estivale classique, le 7 septembre 1994. Dix stations de mesure se succèdent jusqu'à 2km de la rive, au large de Cortailod. Seule la rétrodiffusion présente un profil particulier, et atteint des valeurs maximales supérieures à 0.10% à la base de l'épilimnion. Un régime de vent d'ouest ayant régné la veille (3.48m/s en moyenne journalière), il est tentant de penser que ces vents d'intensité moyenne ont provoqué une resuspension du sédiment. Une influence d'apports de l'Arcuse peut en effet être exclue, son débit n'ayant guère dépassé 1m³/s les jours précédents. Il s'avère cependant que l'augmentation de la rétrodiffusion se corrèle à celle de la chlorophylle et non à une augmentation de la turbidité. Les diagrammes rétrodiffusion versus chlorophylle et rétrodiffusion versus turbidité se rapprochent de ceux établis pour des couches de cyanobactéries (Fig.3.29.). Cette augmentation de la rétrodiffusion est donc probablement due à la présence d'une couche de cyanobactéries à la base de l'épilimnion, ce qui est fréquent en période tardi-estivale ou du début de l'automne.

Il apparaît donc que les vents du 6 septembre n'ont pas provoqué de resuspension sensible de sédiment ou alors que les particules se sont déjà redéposées.

La campagne du 3 octobre 1994 a été effectuée au large de la Pointe du Grin (Fig.4.34.). L'épaisseur de l'épilimnion est d'environ 25m, alors qu'un vent modéré souffle du sud-ouest, les vents ayant été faibles les jours précédents. Les profils de rétrodiffusion et de turbidité montrent un panache turbide qui s'étend jusqu'à 500m de la rive dans les 5 mètres supérieurs de la colonne d'eau. Il s'agit donc clairement ici d'une resuspension de sédiment sur le plateau et d'un transport en overflow vers le large. L'origine du transport en overflow est probablement attribuable au léger contraste de température de l'ordre ou légèrement inférieur à un degré entre 3 et 5m de profondeur (cf. profil de la station LAC73001). Il est difficile de déterminer si le courant n'est pas assez important pour remettre en suspension le sédiment à des profondeurs plus grandes ou si le délai entre l'initiation du vent et celle de courants profonds est trop faible. Il est en effet connu que le temps de réponse de l'influence du vent croît avec la profondeur (Imboden et al. 1983).

Lors de la campagne du 6 décembre 1994, effectuée au large de Chevroux (Fig.4.35.), l'épilimnion totalise une épaisseur d'environ 50m et le contraste de température s'est réduit à environ 3°C. Sur les différents profils, une couche turbide apparaît à la base de l'épilimnion. La turbidité de la partie supérieure de l'épilimnion ne montre pas de décroissance de la rive vers le large. Turbidité et rétrodiffusion ne sont ici pas liées à l'évolution de la chlorophylle, la teneur de celle-ci n'augmentant pas en base d'épilimnion. De plus, la relation rétrodiffusion versus turbidité est caractéristique de la période hivernale (cf. Fig.3.28.E). On peut donc exclure que l'évolution de la turbidité à la base de l'épilimnion soit d'origine biologique et postuler que l'origine de l'augmentation de la concentration particulière provient d'une remise en suspension du sédiment. Il apparaît toutefois étonnant que des courants aient pu provoquer une resuspension de sédiment en base d'épilimnion sans qu'aucune resuspension ne puisse être détectée sur le plateau sud. Si tel est bien le cas, la réponse pourrait se trouver dans le fait que, d'après les modélisations numériques du moins, les courants horizontaux sont élevés à l'interface entre épi- et hypolimnion (Besson, comm. pers.) ou alors à l'effet d'une onde interne, phénomène dont il est reconnu qu'il peut mener à une resuspension du sédiment (Chambers & Eadie 1981).

La campagne du 10 décembre 1992 présente une situation de vent d'est établie depuis trois jours (Fig.4.36.). Le contraste de température entre épi- et hypolimnion est très réduit, de l'ordre de un degré Celsius, et se situe vers 60m dans la vallée septentrionale et 40m dans la vallée méridionale. La turbidité aussi bien que la rétrodiffusion sont maximales à la base de l'épilimnion dans la vallée sud (COCH1204 + 1205) et décroissent légèrement en direction de la surface ainsi que vers le large. Turbidité et rétrodiffusion ont des valeurs supérieures dans la couche épilimnique par rapport à l'hypolimnion, excepté pour une couche d'environ 20m d'épaisseur à la station COCH02.

Le sédiment est donc remis en suspension probablement à toutes les profondeurs épilimniques de la vallée sud et transporté vers le large. Le fait que ce phénomène ne s'observe pas du côté de la rive nord pourrait être dû au fait que la région de Cortailod est relativement protégée du vent du nord-est (Bise) par la pointe d'Arcuse (embouchure de l'Arcuse). L'origine des fortes turbidités observées vers 100m de profondeur dans la vallée nord n'a pu être clairement établie; cette couche turbide n'a pas été observée en direction de l'embouchure de l'Arcuse (stations C1 et C2).

Une homogénéité thermique quasi parfaitement réalisée règne lors des campagnes effectuées les 18 janvier 1993, 19 janvier 1994 et 24 janvier 1995 (Figs.4.37., 4.38. et 4.39.). Lors de ces campagnes et de manière générale durant l'hiver, la turbidité et la rétrodiffusion augmentent de manière exponentielle dans les dix à vingt derniers mètres au-dessus du fond. Ceci indique donc clairement une resuspension de sédiment. Si durant l'été la BNL traduit un état quasi-stationnaire - l'allure de la courbe et la valeur absolue de la turbidité sont quasi invariables en fonction du temps - cela ne semble pas être le cas en hiver, la turbidité y est beaucoup plus variable.

Le 18 janvier 1993 (Fig.4.37.), alors qu'un temps calme a régné durant toute la semaine précédente, on observe tout de même une forte augmentation de la turbidité à proximité du fond.

Le 19 janvier 1994 (Fig.4.38.), la turbidité diminue du Haut-lac en direction du NE et également à proximité du fond. Le débit de la Thielle n'ayant guère été supérieur à la moyenne les jours précédents (16-19 janvier), ce

phénomène n'est probablement pas dû à une influence de cet affluent. Par contre, le vent d'est de force faible à modérée qui a régné les jours précédents pourrait expliquer une resuspension dans la partie sous le vent du lac.

La campagne du 24 janvier 1995 a été réalisée lors d'une période de vents forts à tempétueux. La journée du 22 janvier a été la plus ventée de la période couverte par notre étude, soit depuis mai 1992. La turbidité est relativement faible dans la vallée sud en surface, mais elle augmente fortement avec la profondeur (station 79009 par exemple). Dans la vallée nord, elle est plus élevée en surface mais augmente moins fortement avec la profondeur (station 79007 par exemple). La turbidité diminue à nouveau à proximité de la rive NW et ceci sur une courte distance (<100m). De fortes variations de la turbidité aussi bien verticales que latérales sont donc observées.

Ce schéma de répartition peut être mis en relation avec le régime de vent du sud-ouest. D'après les modèles de circulation (Zuur, 1990), le courant de surface correspondant à un vent du sud-ouest est globalement dirigé vers l'est (ou le sud-est dans le cas du profil considéré), un courant de downwelling longe la pente sud-est et un courant d'upwelling la pente nord-ouest. On peut donc postuler que le courant de fond remet en suspension le sédiment dans la vallée sud et/ou y transporte le sédiment depuis le plateau sud mais que le transport des particules vers la surface est empêché par le courant de downwelling. Dans la vallée nord, au contraire, le courant d'upwelling faciliterait le transport des particules vers la surface.

Discussion

En guise de préambule, il nous faut mentionner que les phénomènes observés lors de cette étude de la turbidité ne concernent pas les courants de turbidité classiques, fortement chargés en particules et qui de par la densité du fluide ainsi formé épousent la pente. Les turbidités et les charges rencontrées excluent la formation d'un tel type de courants, la densité du fluide étant modifiée de façon négligeable. Exemple: une augmentation de turbidité de 1FTU correspond d'après la relation de la figure 3.30.B à une augmentation de charge de 0.88mg/l, ce qui correspond approximativement à une augmentation de densité générée par une diminution de température de un centième de degré à 10°C (Knauss 1978, p.24). Le transport des particules se fera donc essentiellement par advection, en suivant les courants dominants qui règnent dans le lac.

Séparons notre propos en deux parties: 1) période stratifiée à faiblement stratifiée et 2) période non stratifiée.

1) Durant l'été, aucune resuspension de sédiment sur le plateau ou les tombants n'a été mise en évidence par cette étude de la turbidité. Cependant il est certain que des remises en suspension existent sur le plateau, étant visibles à l'œil nu. Il faut également avouer que nous n'avons pas centré notre étude sur cette période. Dans la zone profonde, en plus des panaches produits par les dragages (Fig.3.34.), une couche néphéloïde benthique existe à partir d'environ 100m de profondeur (Figs.3.27. et 3.32.). Cette couche peut être interprétée comme le résultat de l'établissement d'un état stationnaire entre l'influence de la sédimentation et celle de la diffusion des particules à partir de la couche turbulente de fond (BBL) (Wüest 1995). Il est donc clair que des resuspensions de sédiment existent même si leur importance quantitative est incertaine.

En automne, le contraste thermique s'amoindrit mais ne disparaît jamais totalement. Les évidences de resuspension concernent principalement la couche épilimnique, sur le plateau (3.10.94) et sur les tombants (6.12.94 et 10.12.93). Les particules remises en suspension dans l'épilimnion sont transportées au sein de cette couche, soit en overflow (3.10.94), soit dans la couche entière (10.12.94), ou encore en interflow (6.12.94). La densité relative de la suspension détermine alors la localisation de son transport sur l'axe vertical, et le gradient de densité détermine l'intensité du mélange vertical de la suspension avec les couches sus- ou sous-jacentes. Le fait que les particules puissent être réparties et transportées dans la totalité de la couche épilimnique avec des concentrations similaires sur toute l'épaisseur est à relier à l'important mélange convectif qui affecte probablement l'épilimnion durant la période automnale (Imboden et al. 1983, Besson, comm. pers.), ce qui est également indiqué par le fait que la température y est généralement quasi constante.

La stratification thermique semble donc avoir une forte influence sur la localisation des resuspensions et sur le transport des particules.

2) C'est durant la période hivernale non stratifiée que la turbidité montre le plus de variations spatiales.

La resuspension a apparemment lieu à toutes profondeurs. Comme nous l'avons déjà mentionné, les charges en cause ne permettent pas la formation de courants de densité. Toutefois les apports latéraux peuvent se faire par les courants de fond. Dans le cas de la campagne du 24.1.95, la turbidité est plus faible sur le plateau et le talus nord que dans la zone profonde, ce qui est attribuable à de la resuspension in situ dans la zone profonde.

Lors de cette même campagne, le gradient de turbidité est par endroits aussi élevé horizontalement que verticalement, notamment au niveau des stations du tombant nord-ouest. Cela implique un mélange vertical efficace. Le rapport entre vitesses de mélange verticale et horizontale induit si l'on accepte que la turbidité correspond bien à une mesure de la charge particulaire est compris entre 1/10 et 1. On peut donc postuler que la convection à large échelle est responsable du mélange vertical.

Durant la période hivernale, les particules seront donc transportées suivant le schéma général de la circulation dans le lac. A cet égard, le bon accord entre la répartition de la turbidité le 24.1.95 et le schéma général de circulation que l'on peut prévoir par simulation numérique pour un régime de vent d'ouest (Zuur & Dietrich 1990) est un argument positif.

La Figure 4.40. présente une comparaison entre la turbidité moyenne de la colonne d'eau lors de chaque campagne hivernale et la moyenne des kilomètres parcourus par les vents les jours précédents, et ceci pour des périodes de respectivement 5, 10, 20, 30 et 45 jours. La corrélation entre les deux termes s'améliore entre 5 jours ($r^2=0.33$) et 20 jours ($r^2=0.69$) et diminue ensuite (45 jours: $r^2=0.11$). Ce fait tendrait donc d'une part à confirmer que le temps de résidence des particules est d'un ordre de grandeur proche de 20 jours et implique d'autre part que les particules sont réparties dans un laps de temps limité sur la totalité de la colonne d'eau, la déviation standard des valeurs de turbidité étant faible, inférieure à 0.15FTU. Ceci confirme donc l'existence du mécanisme de convection à large échelle durant l'hiver.

Conclusions

La stratification thermique a une influence prépondérante sur la localisation de la resuspension. Durant la période stratifiée, les particules semblent avant tout remises en suspension dans la couche épilimnique. Elles sont transportées au sein de celle-ci, en overflow, en interflow ou dans la totalité de la couche épilimnique, en fonction de la structure thermique de l'épilimnion.

Lorsque l'homogénéité thermique est atteinte, soit en janvier au cours des trois années de notre étude, la resuspension de sédiment peut se réaliser à n'importe quelle profondeur d'eau. Les particules sont réparties dans la totalité de la colonne d'eau, ce qui est dû à un mélange convectif à large échelle efficace. La campagne du 24.1.95 a montré que la répartition spatiale des particules peut, dans certains cas du moins, tracer la circulation générale. Ceci a pour corollaire un transport efficace des particules vers la surface en situation d'upwelling et un relatif maintien des particules dans l'hypolimnion dans les zones de downwelling. Cette hypothèse mériterait d'être vérifiée lors d'autres périodes de tempêtes.

Il semble que les courants de fond ne sont pas assez importants pour remettre en suspension de manière importante le sédiment en zone profonde durant la période stratifiée, au contraire de la période non stratifiée.

4.4.9.5. Bilan de la sédimentation

Suite aux conclusions du paragraphe précédent, nous avons entrepris un calcul de bilan afin notamment de tenter de répondre à la question suivante:

- Est-ce que la resuspension par les vagues sur le plateau lacustre permet d'expliquer les flux enregistrés dans les zones profondes durant la période hivernale ou est-ce qu'une autre source de sédiment est nécessaire pour expliquer leur ampleur?

Nous avons entrepris plusieurs calculs basés sur des hypothèses simplifiées. L'équilibre du bilan est établi d'après la courbe hypsométrique du lac (Fig.4.41.).

1- le sédiment accumulé sur le plateau durant l'été (6 mois) fournit la totalité du matériel récolté dans la zone profonde durant la période hivernale (6 mois):

- le stock accumulé sur le plateau durant l'été est considéré comme étant égal à la moyenne des flux de Chevroux et Cortailloz à 30m de profondeur, ce qui représente probablement une surestimation, ces flux étant empreints de l'influence de la resuspension estivale;

- la resuspension qui atteint la zone profonde est considérée comme étant égale à la totalité du flux de la station de Chez-le-Bart à 120m de profondeur

Moyenne du flux total estival de Cortailloz et de Chevroux (30m): **4.29(g/m²*j)**

Moyenne du flux total hivernal de Chez-le-Bart (120m): **6.23(g/m²*j)**

L'équilibre entre ces flux s'établit à 59.2% de la surface du lac, soit à plus de 80m de profondeur.

2- Le flux hivernal mesuré à 120m de profondeur à Chez-le-Bart n'est bien entendu pas uniquement constitué de matériel remis en suspension. Un calcul de bilan plus précis consiste à ne considérer que la partie carbonatée autochtone des flux. En procédant de cette manière on néglige la partie détritique qui se dépose sur le plateau. Cependant, la composition du matériel récolté dans les pièges est toujours plus carbonatée sur les tombants que dans la zone profonde, ce qui implique que l'on a plutôt tendance à procéder à une surestimation relative de la quantité de sédiment susceptible d'être remise en suspension.

La quantité de carbonates allochtones à déduire du flux carbonaté est estimée d'après la méthode (A+D)/(A+D+C) (cf. paragraphe 4.4.6.).

Moyenne du flux carbonaté autochtone estival de Cortailloz et de Chevroux (30m) = (Flux total) x (% de carbonates) x (% de carbonates autochtones dans la totalité des carbonates):

$$4.29 \times 0.734 \times 0.917 = 2.89(\text{g/m}^2\text{*j}) \quad (1)$$

A titre indicatif, le flux estival de calcite calculé d'après la diminution épilimnique de la conductivité s'établit à **2.93(g/m²*j)** ((3.74+2.20+2.86)/3; cf. Fig.4.22.)

Moyenne du flux carbonaté autochtone hivernal à Chez-le-Bart (120m):

$$6.23 \times 0.527 \times 0.780 = 2.56(\text{g/m}^2\text{*j}) \quad (2)$$

L'équilibre entre ces flux s'établit à 47.0% de la surface du lac, soit à un peu plus de 60m de profondeur.

3- Il est encore possible d'inverser le calcul: en postulant que l'influence des vagues se fait sentir jusqu'à 20m de profondeur et que la production estivale sur le plateau est égale à la moyenne des flux de Chevroux et Cortaillod à 30m.

Deux calculs basés sur les hypothèses suivantes ont été effectués:

A. Dans le premier, la production de calcite endogénique est considérée comme une constante par unité de volume. De plus, nous considérons que la totalité de la calcite est précipitée dans la couche 0-10m, ce qui correspond approximativement à l'épaisseur de la couche épilimnique durant l'été.

Flux carbonaté autochtone dans la zone de resédimentation = [(profondeur moyenne de la couche 0-10m dans la zone située sous une tranche d'eau inférieure à 20m / 10) x (flux moyen estival de calcite autochtone à 30m de Cortaillod et Chevroux)] / [(surface du lac situé sous une tranche d'eau de plus de 20m) / (surface du lac situé sous une tranche d'eau inférieure à 20m)]:

$$(0.551 \times 2.890) / (0.7242/0.2758) = 0.607(\text{g/m}^2\text{*j}) \quad (3a)$$

Ces 0.607(g/m²*j) représentent 24% de notre estimation en (2)

B. Nous pouvons encore postuler que la quantité de calcite précipitée par unité de volume soit plus élevée sur le plateau que dans le domaine pélagique, les eaux de la zone côtière étant certainement légèrement plus chaudes et plus productives. Des conductivités plus faibles sur le plateau que dans le domaine pélagique ont été observées, de manière ponctuelle et d'ampleur très limitée, de l'ordre de 1-2(μS/cm). Il est cependant possible qu'un bon transfert latéral se fasse et mélange les eaux moins conductrices de la zone côtière avec celles plus conductrices du domaine pélagique. Si nous postulons un doublement de la production de calcite par unité de volume dans la zone de moins de 20m de tranche d'eau, nous obtenons le résultat suivant:

$$(0.551 \times 5.780) / (0.7242/0.2758) = 1.213(\text{g/m}^2\text{*j}) \quad (3b)$$

Ces 1.213(g/m²*j) représentent 47% de notre estimation en (2)

D'après ces calculs, le sédiment accumulé sur le plateau durant l'été est susceptible de fournir une partie du matériel récolté dans la zone profonde durant l'hiver, une partie non négligeable mais relativement modeste toutefois. Nous postulons donc que les courants de fond sont de manière prépondérante à l'origine de la remise en suspension du matériel.

Nous avons encore repris les calculs ci-dessus pour les flux mesurés non plus à 120m mais à 30m de profondeur à la station de Chez-le-Bart. Les résultats sont les suivants:

1. Flux à 30m: 2.90(g/m²*j); Equilibre des flux à 40.4% de la surface du lac, soit à environ 50m de profondeur.
2. Flux de calcite autochtone à 30m: 2.90 * 0.510 * 0.780 = 1.15(g/m²*j); Equilibre des flux à 28.5% de la surface du lac, soit à un peu plus de 20m de profondeur
- 3.A. Le flux estimé en (3a) représente 53% de 1.15(g/m²*j)
- 3.B. Le flux estimé en (3b) représente 105% de 1.15(g/m²*j)

Il paraît donc difficilement concevable que le flux mesuré en hiver dans la plaine à proximité de la surface provienne exclusivement de resuspensions sur le plateau. Il est bien plus probable que le matériel provienne conjointement de transferts latéraux et verticaux. Le fait que le matériel récolté à Chez-le-Bart en hiver devienne légèrement plus carbonaté avec la profondeur (3% d'augmentation en moyenne entre la surface et le fond) est également un argument en faveur de l'existence de transferts verticaux depuis le fond, de même que le fait que le pourcentage de carbonates se rapproche de celui du sédiment de la station avec l'augmentation du flux.

4.4.9.6. Tentative de quantification de la resuspension

Il s'avère le plus souvent très ardu de procéder à une estimation quantitative de la resuspension. De nombreux auteurs soustraient simplement le flux mesuré dans la région de la thermocline ou dans l'épilimnion du flux des pièges situés à proximité du fond ou situés dans l'hypolimnion de manière générale (Gardner 1977; Chambers & Eadie 1981; Bloesch 1982; Rosa 1985; Bloesch & Uehlinger 1986; Charlton & Lean 1987; Eadie et al. 1990; Evans & Håkanson 1992). Cette manière de faire s'appuie la plupart du temps sur des évidences indépendantes de l'absence de matériel provenant de resuspensions dans les pièges localisés à proximité de la surface du lac mais elle ne paraît pas judicieuse dans notre cas, surtout pour la période d'homothermie, étant donné que nous avons justement des arguments en faveur de la présence de matériel en provenance de resuspensions jusqu'en surface. Certaines méthodes utilisent des organismes benthiques ou littoraux, comme les larves de *Chironomus* (Lastein 1976) ou le pourcentage de diatomées littorales (Simola 1981). Flower (1991) propose une méthode intéressante, à savoir de comparer les résultats de pièges de différents facteurs de forme, les pièges les plus plats ou évasés étant le plus susceptibles de représenter les flux sédimentaires nets. Certains auteurs (Gasith 1975; Bloesch 1982) tentent d'estimer le pourcentage de matériel provenant de resuspensions en considérant la composition du matériel récolté dans les pièges comme fruit d'un mélange linéaire entre la composition du seston et celle du sédiment et en se basant sur les teneurs en carbone organique, azote ou encore phosphore. Cette méthode appelée encore "label approach" a été introduite par Gasith (1975). Elle se heurte pourtant à certaines limitations, en partie dues à la difficulté d'estimer correctement la teneur du seston en l'élément traceur (Evans &

Håkanson 1992). De plus, et c'est peut-être là le facteur le plus important, le seston peut être contaminé par la resuspension, rendant l'estimation d'une teneur "non contaminée" difficile. Une minéralisation partielle du matériel récolté dans les pièges est hautement probable, de longues périodes d'exposition des pièges (32,4j en moyenne lors de notre étude) favorisant cette dégradation. D'autres études ont estimé un taux de dégradation du carbone organique de 1% par jour (Gardner et al. 1983; Knauer et al. 1984), ce qui représenterait des pertes de 20-40% du carbone organique dans notre cas.

Le fait que les temps d'exposition aient relativement fortement varié (32.4 ± 9.8 jours) ne plaide pas non plus en faveur d'une utilisation du carbone organique. Probablement que cette méthode peut donner des résultats acceptables dans des lacs eutrophes où la proportion de matière organique du seston est élevée.

Il nous a paru plus judicieux de considérer un paramètre qui peut sous certaines réserves être considéré comme conservatif, soit le contenu en carbonates et d'adopter une méthode quelque peu différente, sans estimation des teneurs "non contaminées" du seston.

Notre tentative de quantification de la resuspension autumnale et hivernale a donc été établie en postulant que le sédiment de surface de la station considérée constitue la source unique du matériel remis en suspension. On présume donc que le transport du sédiment se fait uniquement verticalement, ce qui ne reflète évidemment pas la réalité, mais constitue à notre sens une simplification acceptable, étant donné les conclusions que nous avons tirées précédemment.

L'estimation quantitative de la resuspension à l'aide de cette méthode n'est possible qu'à partir de la deuxième partie de l'automne et jusqu'en printemps, au moment où la précipitation de calcite reprend, puisqu'il n'y a alors plus deux, mais trois composantes: carbonates endogéniques, sédiment remis en suspension et partie détritique.

La quantification de la resuspension durant la période estivale se base sur la différence entre le flux carbonaté et l'estimation de la quantité de calcite précipitée durant l'été d'après les diminutions épilimniques de la conductivité et du calcium dissous (Fig.4.22.). On obtient ainsi une part carbonatée du flux resuspendu qui est ensuite rapportée au flux resuspendu total d'après la composition moyenne du matériel récolté.

En ce qui concerne la méthode "hivernale", le calcul de la part resuspendue du flux se base donc sur la teneur comparée du matériel récolté et du sédiment de surface de la station considérée. Afin de minimiser les erreurs d'estimation imputables à l'analyse d'un seul échantillon du sédiment de surface, nous avons considéré la moyenne de la teneur en carbonates du tombant nord pour la station de Cortaillod, la moyenne du tombant sud pour la station de Chevroux et la moyenne du bassin NW pour la station de Chez-le-Bart. Dans chaque cas ces moyennes diffèrent de moins de 2% des valeurs individuelles du sédiment de surface des 3 stations. Nous avons donc considéré:

- un pôle resuspendu, représenté par la teneur moyenne du sédiment en carbonates, soit 72.2% à Chevroux, 66.3% à Cortaillod et 64.1% à Chez-le-Bart.
- un pôle détritique, représenté par la teneur moyenne en carbonates des 4 affluents Areuse, Thielle, Seyon et Menue, soit 26.4% (Tab.4.2.). D'après nos conclusions du paragraphe 4.2.1., ces rivières constituent les 4 plus importants affluents du lac de Neuchâtel du point de vue des débits solides.

Le pourcentage de matériel provenant de resuspensions s'exprime donc comme suit:

$$R = 100 * (C_p - C_d) / (C_s - C_d) \quad (4-6)$$

où:

R est le pourcentage de matériel provenant de resuspensions

C_p est le contenu en carbonates (%) du matériel récolté dans le piège considéré

C_d est le contenu en carbonates (%) des apports allochtones

C_s est le contenu en carbonates du sédiment de surface de la station considérée

Cette manière de faire postule qu'aucune précipitation de calcite n'a lieu ce qui paraît acceptable de novembre à avril étant donné les conclusions tirées précédemment ainsi que celles de Filippi et al. (cf. paragraphe 4.4.11.). Ce calcul entraîne probablement une légère surestimation du pourcentage de resuspension car on néglige totalement le transfert latéral depuis le plateau, qui d'après la composition du sédiment de surface (Fig.5.17.) apporte du matériel plus carbonaté que celui remis en suspension in situ. D'autre part, une grande incertitude est liée à la caractérisation de la composition des apports détritiques, qui n'a fait l'objet que d'une étude relativement sommaire. Une imprécision supplémentaire provient du fait que l'on néglige totalement la production de matière organique dans le lac.

Malgré ses nombreux défauts cette évaluation est certainement plus précise qu'une simple soustraction des flux épilimniques aux flux hypolimniques étant donné la faible production de particules dans l'épilimnion qu'il est à attendre pour la période non stratifiée.

Les résultats de ces estimations en ce qui concerne la période hivernale sont présentés à la Figure 4.42. Comme nous l'avons déjà mentionné, le schéma des flux et de la composition du sédiment évolue entre deux situations extrêmes: durant certaines périodes, le flux total évolue fortement avec la profondeur (le rapport entre le flux à proximité du fond et le flux de surface est élevé), le pourcentage estimé de resuspension suit alors les mêmes tendances (exemples du 15.3.-20.4.93, 10.11.-3.12.93, 8.3.-20.4.94, 7.11.-24.11.94 et 24.11.-19.12.94.). Pour d'autres périodes qui sont celles d'une évolution relativement modérée du flux total avec la profondeur (le rapport

entre le flux à proximité du fond et le flux de surface est faible), le pourcentage estimé de resuspension évolue peu avec la profondeur et la différence de pourcentage entre les tombants et la plaine est faible (exemples du 3.12.-3.1.94, 3.1.-1.2.94, 1.2.-8.3.94, 19.12.-31.1.95 et 31.1.-24.3.95). Remarquez que le premier type de situations se situe en automne et en début de printemps alors que le second se situe en hiver.

Les estimations du flux resuspendif et du flux détritique (flux total - flux resuspendif) sont également présentées. Si le flux resuspendif évolue de manière apparemment exponentielle à l'approche du fond, le flux détritique est soit constant avec la profondeur, soit évolue de manière proche de la linéarité en fonction de la profondeur, à quelques exceptions près. Ces exceptions (Fig.4.42.: 1.2.-8.3.94, 8.3.-20.4.94, 31.1.-24.3.95,...), périodes où l'augmentation du flux détritique à proximité du fond est la plus évidente, pourraient s'expliquer par un transfert latéral de matériel à la composition différente de celle du sédiment de surface de la station considérée, ou alors pourraient être liées à une remise en suspension préférentielle de matériel fraîchement sédimenté, dont la composition est également susceptible de différer de la composition moyenne du sédiment de proche surface.

En Figure 4.43.A, nous avons comparé le pourcentage de resuspension estimé par notre méthode à celui de la méthode de Filippi et al. (in prep.; cf.4.4.11.), qui se base sur les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ du matériel des pièges comparées à celles des suspensions de l'Areuse. La correspondance entre ces deux estimations est relativement bonne. Bien que notre méthode produise des résultats légèrement plus élevés. Il faut cependant ajouter que la méthode de Filippi et al. (in prep.; cf.4.4.11.) ne tient pas compte de la part allochtone des carbonates. Si nous corrigeons les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ des pièges de la part allochtone des carbonates estimée par la minéralogie, les pourcentages obtenus par Filippi et al. sont augmentés de 10-20% et la correspondance entre les deux estimations s'améliore (Fig.4.43.B).

La méthode que nous avons adoptée n'est qu'approximative, et ceci pour plusieurs raisons: premièrement l'estimation du pourcentage en carbonates des apports détritiques est extrêmement grossière; deuxièmement la méthode néglige la part organique du flux sédimentaire; troisièmement, les limites temporelles de la précipitation carbonatée ne sont pas parfaitement bien définies; enfin, le fait que l'on néglige l'influence possible d'apports latéraux introduit un facteur d'erreur supplémentaire.

Les flux resuspendifs estimés peuvent s'exprimer par une relation de diminution exponentielle du flux à partir du sédiment:

$$J = J_0 \exp^{-bz} \quad (\text{Chambers \& Eadie 1981; Eadie et al. 1990}) \quad (4-7)$$

où:

J [g/m²*j] est le flux de matériel remis en suspension qui parvient à la distance z du fond

J_0 [g/m²*j] est le flux de matériel remis en suspension à l'interface eau-sédiment ($z=0$)

z [m] est la distance depuis le fond

b [1/m] représente le rapport entre vitesse de chute et diffusion turbulente verticale ($b = v/Dz$).

L'évolution de la concentration de la colonne d'eau en matériel particulaire est décrite par l'équation aux dérivées partielles suivante:

$$\frac{\partial C}{\partial t}(z,t) - v \frac{\partial C}{\partial z}(z,t) = Dz \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}(z,t) \quad (4-8)$$

où:

v est la vitesse de chute des particules (dirigée vers le bas); Dz est le coefficient de diffusion turbulente (verticale)

Le terme $-v \frac{\partial C}{\partial z}$ est un terme de transport sédimentaire agissant vers le bas; il est donné par la vitesse $-v$.

$Dz \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}(z,t)$ est un terme de diffusion turbulente qui agit vers les concentrations plus faibles

A l'état stationnaire (i.e. lorsque C est indépendant de t), la somme des termes qui décrivent le transport sédimentaire et la diffusion turbulente s'annulent et on obtient l'équation différentielle:

$$-v \frac{dC}{dz} = Dz \frac{d^2 C}{dz^2} \quad (4-9)$$

ou encore:

$$-v C' = Dz C'' \quad (4-10)$$

dont la solution est:

$$C(z) = \gamma e^{-\frac{v}{Dz}z} + \beta \quad (4-11)$$

- lorsque $z \rightarrow \infty$, on veut $C=0$ (la concentration due à la resuspension tend vers 0 quand la distance tend vers l'infini), et donc $\beta=0$.

- lorsque $z=0$, on a $C(0)=C_0$ et donc $\gamma=C_0$, d'où:

$$C(z) = C_0 e^{-\frac{v}{Dz}z} = C_0 e^{-bz} \quad \text{avec } b=v/Dz \quad (4-12)$$

Le flux sédimentaire étant le produit de la concentration par la vitesse du transport, l'équation (4-7) s'obtient en multipliant les termes de l'équation (4-12) par la vitesse du transport. Cette dernière est évaluée par la méthode décrite en 4.4.5. (équation 4-2): les moyennes saisonnières de la vitesse globale de sédimentation de la plaine et des tombants sont considérées dans l'équation (4-7) (cf Annexe 4.9.).

Nous avons donc approché les profils des flux resuspendifs automnaux et hivernaux à l'aide de cette relation (équation (4-7)) (Fig.4.44.). Les paramètres principaux obtenus pour la période hivernale sont présentés en Annexe 4.9.; Jo, le flux resuspendif à l'interface eau-sédiment; b, le rapport entre vitesse de chute et coefficient de diffusion turbulente; Dz, le coefficient de diffusion turbulente verticale. En Annexe 4.10. sont présentés les paramètres obtenus pour l'année entière: Jo; R1, flux resuspendif moyen de la totalité de la colonne d'eau; R2, flux resuspendif qui parvient à la couche épilimnique, soit le flux resuspendif moyen de la couche 0-20m. Tous les paramètres n'ont pu être déterminés pour toutes les périodes d'exposition des pièges du fait des méthodes différentes de quantification de la resuspension adoptées pour l'hiver et l'été. Un résumé de la méthode adoptée dans chaque cas est présenté ci-dessous:

	Chez-le-Bart	Cortailod et Chevroux
Jo (hivers 93-95)	équation (1)	équation (1)
Jo (hiver 92-93)	-	Ftot(fond)- Ftot(10)
Jo (été)	Ftot(fond)- Ftot(50)	Ftot(fond)- Ftot(10)
R1 (hivers 93-95)	équation (1)	équation (1)
R1 (hiver 92-93)	-	Fresusp moyen (fct z)
R1 (été)	Ftot(moyen)- Ftot(50)	R1carb = Cc précip. - Fcarb moyen
R2 (hivers 93-95)	équation (1)	équation (1)
R2 (hiver 92-93)	-	Fresusp à 10m
R2 (été)	0	R2carb = Cc précip. - Fcarb (10)

Tab.4.7. Résumé des méthodes de calcul des flux resuspendifs pour chaque station. Ftot: Flux total; (50): profondeur = 50m; Fresusp: flux resuspendif; Xcarb: flux carbonaté; Cc précip: quantité de calcite précipitée estimée d'après la diminution épilimnique de la conductivité.

Un des paramètres les plus intéressants à considérer est le coefficient de diffusion turbulente verticale Dz, qui s'obtient en divisant la vitesse de chute par le coefficient b. Les résultats sont présentés à la Figure 4.45. Les valeurs de Dz obtenues par cette méthode sont très faibles en été à la station de Chez-le-Bart (2.2cm²/s en moyenne); les flux resuspendifs à l'interface eau-sédiment (Jo=1.13g/m²*j en moyenne estivale) sont donc très limités dans leur extension verticale (R1=0.04, R2=0; Annexe 4.11.). Le coefficient Dz augmente ensuite au cours de l'automne (10.5cm²/s en moyenne à Chez-le-Bart) pour atteindre des valeurs maximales durant la période d'homothermie (70.9cm²/s en moyenne à Chez-le-Bart). Il diminue ensuite dès le début du printemps, soit au début du réchauffement épilimnique. Le même schéma semble valable pour les 3 stations, les valeurs atteintes étant toutefois de manière générale les plus élevées à la station de Chez-le-Bart et les plus faibles à la station de Chevroux.

Il existe plusieurs manières indépendantes d'estimer le transport et le mélange de l'eau et des substances présentes dans un lac (Imboden et al. 1983). Les méthodes les plus fréquentes utilisent des traceurs naturels; le radon-222 qui est issu de la désintégration du radium-226 du sédiment est qui a une demi-vie de 3.3jours; la concentration en phosphore ou en méthane dans l'hypolimnion des lacs eutrophes; le rapport 3He/4He en combinaison avec la concentration en tritium, qui permet d'estimer "l'âge" d'une couche d'eau par rapport à l'échange eau-atmosphère. Une manière simple d'estimer les coefficients de diffusion verticale est celle du budget de chaleur (Nyffeler et al. 1983; EAWAG 1995). En postulant que l'homogénéité horizontale est atteinte et qu'un accroissement de température dans l'hypolimnion d'un lac est uniquement dû à la diffusion turbulente à travers la surface de la couche à la profondeur considérée, alors la différence de chaleur interne est donnée par la première loi de Fick, Dz étant alors donné par:

$$D_z = \frac{- \int_{z_0}^{z_{max}} A_z \frac{\partial T}{\partial t} dz}{A_0 \frac{\partial T}{\partial z} |_{z_0}} \quad (4-13)$$

T: température; t: temps; z: profondeur; A_z: surface du lac à la profondeur z; A₀: surface du lac à la profondeur z₀

Le coefficient de diffusion verticale hypolimnique (60m-fond) a été calculé pour la période automnale 1994. Il est impossible de déduire le coefficient de diffusion verticale pour la période hivernale par cette méthode, le flux de chaleur dans l'hypolimnion devenant négatif. Les résultats (Tab.4.8. et Fig.4.45.) montrent une augmentation générale des valeurs entre septembre-octobre (moyenne: 0.15cm²/s) et novembre-décembre (moyenne: 1.83cm²/s). Ils sont donc compatibles avec les résultats de la station de Chez-le-Bart en début d'automne, mais deviennent un ordre de grandeur plus faibles en fin d'automne.

profondeur (m)	Dz (2.9.-18.10.94)	Dz (18.10.-7.11.94)	Dz (7.11.-24.11.94)	Dz (24.11.-19.12.94)
60	0.29	1.20	1.58	1.29
70	0.40	1.00	2.32	5.16
80	0.11	0.89	1.74	3.25
90	0.04	0.39	1.93	1.88
100	-0.01	0.17	1.03	0.57
110	0.03	-0.02	1.74	0.66
120	0.19	-0.16	2.03	-0.01
moyenne	0.15	0.50	1.77	1.83

Tab.4.8. Coefficients de diffusion turbulente verticale hypolimnique estimés d'après la méthode du budget de chaleur

Il nous faut toutefois préciser que ces calculs ne peuvent être qu'indicatifs; ils ne se basent que sur une seule station et peuvent donc être sujets à un biaisage dû aux ondes internes. Par la même méthode combinée à celle du radon-222, Nyffeler et al. (1983) obtiennent pour le Lac de Bienne des valeurs hypolimniques estivales comprises entre 0.01 et 0.2cm²/s. D'autres études montrent des résultats similaires, voire des valeurs encore plus faibles pour l'hypolimnion estival: Imboden et al. (1983) pour le Baldeggersee, Li (1973) pour le Lac de Zürich ou encore Jassby and Powell (1975) pour le Castle Lake. Selon les résultats de Nyffeler et al. (1983), le coefficient de diffusion verticale hypolimnique du lac de Bienne augmente fortement en décembre où il dépasse 100cm²/s et rediminue en mars pour passer en dessous de l'unité en avril. Cette évolution saisonnière du coefficient de diffusion verticale est donc comparable à celle que nous avons obtenue pour le lac de Neuchâtel. Concernant les lacs Michigan, Huron et Superior, les calculs de Eadie et al. (1990) admettent des coefficients de diffusion turbulente qui varient entre 40 et 126[cm²/s] selon le lac considéré pour la période non stratifiée, ce qui est très proche des résultats de la station de Chez-le-Dart (70.9[cm²/s] en moyenne durant l'hiver). Leurs calculs qui se basent sur la même méthode que la nôtre admettent également des valeurs moins élevées en été.

Il est encore à noter que des disparités entre les résultats obtenus par les profils de température et ceux obtenus par des traceurs chimiques ont déjà été rencontrées (Imboden et al. 1981; Imboden et al. 1983), les causes invoquées étant un mélange plus important à proximité du fond (courants de fond) ou encore une sensibilité des traceurs à des mécanismes de mélange différents. Dans notre cas, il est probable que la simplification que constitue le fait de considérer les profils obtenus comme le reflet d'un état stationnaire modifie de manière sensible le résultat des coefficients de diffusion. Un calcul basé sur les mesures de charge en suspension effectuées a en effet montré que la variation de la charge par unité de temps est du même ordre de grandeur que les autres termes de l'équation (4-8). Il aurait donc fallu mesurer les charges en suspension de manière plus régulière.

Il faut en outre considérer que le traceur que constituent les particules peut d'une part avoir d'autres sources que la resuspension locale à partir du fond (des apports resuspendus latéraux ne sont pas exclus) et que notre calcul de la proportion de matériel provenant de resuspensions ne peut être considéré que comme semi-quantitatif.

En hiver et en automne dans l'épilimnion - voire en été lors d'activité atmosphérique perturbé e- le processus le plus actif de mélange est probablement constitué par de la convection instaurée par le refroidissement de surface (Imboden et al. 1983). Les coefficients de diffusion déduits ne caractérisent donc pas véritablement le processus de diffusion verticale à petite échelle mais plutôt le fait que le mélange vertical soit fortement augmenté par de la convection à grande échelle.

D'autre part, comme nous le montrons plus loin, les valeurs différentes obtenues d'une station à l'autre ne reflètent certainement pas un mélange vertical différent mais plutôt des caractéristiques hydrodynamiques différentes.

La Figure 4.46. présente l'évolution des flux Jo, R1 et R2 pour chaque station. A Chez-le-Bart, le flux Jo peut se révéler non négligeable en été, mais les flux R1 et R2 sont insignifiants. Le sédiment remis en suspension n'est distribué de manière efficace dans la colonne d'eau que durant la période hivernale. Ce constat est partiellement valable pour les stations des tombants, R1 étant le plus élevé durant l'hiver, du moins à la station de Cortaillod. Le flux R1 peut être cependant relativement élevé en été, et traduirait un transfert latéral depuis le plateau. Remarquez que pour les trois stations, bien que ce soit quelque peu moins évident en ce qui concerne Chevroux, la distribution du sédiment au sein de la colonne d'eau est plus efficace en hiver qu'en automne.

Nous avons également tenté d'estimer l'efficacité - indirecte - des vents à remettre en suspension le sédiment en divisant le flux Jo déduit précédemment par la moyenne journalière des kilomètres parcourus par les vents supérieurs à 2m/s (Fig.4.47.). Les résultats montrent tout d'abord une claire périodicité de ce rapport qui est maximal en automne sur les tombants, y diminue fortement en hiver et y est minimal du printemps à l'été. Les valeurs plus modérées de l'automne 92 sont la conséquence de la méthode de calcul différente (cf. Tab.4.7.). A la station de Chez-le-Bart ce rapport atteint ses valeurs maximales plus tard, de la fin de l'automne au milieu de l'hiver. Il est de plus généralement moins élevé que sur les tombants, excepté en hiver où il peut atteindre des valeurs équivalentes, voire supérieures (janvier-avril 1993).

4.4.9.7. Importance de la resuspension dans le recyclage des sels nutritifs et en particulier de celui du phosphore

Le phosphore étant généralement le sel nutritif limitant dans un lac, il nous a paru intéressant de tenter d'estimer l'influence des resuspensions dans son bilan.

Les résultats sont présentés à la Figure 4.48, ainsi qu'en Annexe 4.11. Nous avons tout d'abord calculé les moyennes des flux R1 et R2 qui s'élèvent pour la période hivernale à respectivement 2.24 et 1.10[g/m²*j] pour la zone profonde et respectivement 5.21 et 3.03[g/m²*j] pour les tombants. Les mêmes paramètres deviennent très faibles dans la zone profonde en période estivale (respectivement 0.04 et 0.00[g/m²*j]) alors qu'ils restent relativement élevés sur les tombants (respectivement 3.06 et 1.78[g/m²*j]). Les parts de ces flux relatives au carbone organique, à l'azote et au phosphore ont été calculées d'après la composition moyenne du sédiment de surface des stations de plaine profonde et des tombants respectivement (Annexe 5.6.). Pour le calcul de bilan, nous avons considéré la moyenne des valeurs de la plaine et des tombants, ce qui revient à dire que la station de Chez-le-Bart est considérée comme caractéristique de ce qui se passe entre 65m et la profondeur maximale du lac et les stations des tombants de ce qui se passe entre 0 et 65m, qui est la profondeur moyenne du lac.

La charge en phosphore qui émit supérieure à 300[t/an] au milieu des années 80 (OFPE 1987) est tombée au-dessous de 150[t/an] ou 688[mg/m²*j] au début des années 90 (OFEP 1994). C'est de cette dernière valeur dont nous avons tenu compte dans notre bilan. Le stock du lac en phosphore se base sur une concentration moyenne de 20µg/l (Service cantonal de la protection de l'environnement du canton de Neuchâtel, cf. Fig.3.1.), alors que le calcul du flux sédimentaire de phosphore (F_s) obéit à une relation d'augmentation linéaire avec la profondeur du taux d'accumulation totale (Fig.5.19.B), où le taux d'accumulation de la zone située entre 0 et 20m de profondeur est considéré comme nul:

$$F_s = \int_{z=20}^{z_{\max}} \frac{(0.734 + 0.0165z) A_z}{A_{\text{tot}}} C_p dz \quad (4-14)$$

z : profondeur

C_p : concentration du sédiment de l'intervalle z (env. 1950-1993) en phosphore, soit 0.46‰ sur les tombants ($z < 65m$) et 0.60‰ dans la plaine ($z > 65m$).

A_z : surface du lac à la profondeur z

A_{tot} : surface totale du lac

Le résultat de 79[t/an] ou 362[mg/m²*j] doit donc être considéré comme une estimation de la moyenne du flux sédimentaire de phosphore acido-soluble (HCL 1N, 90°C, 1/2h) entre 1950 et 1993. Ce résultat correspond à environ 45% de celui obtenu pour l'année 1983 par l'OFPE (1987)¹ ou encore aux 2/3 de l'approximation obtenue en 1986 par Bapst (1987). En ce qui concerne la charge resuspensive, nous obtenons un flux R1 de 343[mg P/m²] durant l'hiver et de 131[mg P/m²] durant l'été, soit respectivement 75[t] et 29[t] de phosphore. Le flux R2 est plus limité, 189[mg P/m²] ou 41[t] en hiver et 76[mg P/m²] ou 16[t] en été. D'après nos conclusions précédentes, les charges estivales sont principalement d'origine latérale, la resuspension dans la plaine profonde étant négligeable en été.

Le flux resuspensif de phosphore particulaire (moyenne des flux R1 de l'été et de l'hiver) représente donc environ les 2/3 de la charge au lac (103[t] contre 150[t]). A titre indicatif et d'après la même méthode de calcul, le flux resuspensif d'azote ne représente qu'environ 8% de la charge totale au lac (Annexe 4.11.).

Discussion

Fanning et al. (1982) ont proposé que la resuspension joue un rôle important dans le recyclage des sels nutritifs dans la zone côtière peu profonde des océans.

Dans le lac Michigan, la quantité de phosphore qui atteint annuellement la zone euphotique en provenance de resuspension est environ 5 fois supérieure à la charge annuelle que reçoit le lac en provenance de sources extérieures (Eadie et al. 1984). De telles observations ont également été faites dans de petits lacs, comme le Chalk Lake (0.52km²), où le flux de phosphore particulaire issu de resuspensions excède l'apport au lac d'un facteur 10 (Evans 1993).

(Eadie et al. 1990)	période non stratifiée uniquement		
R(mg/m ² *j)	Michigan	Huron	Superior
C	250	212	58
N	60	27	13
P	7.2	5.8	1.2
P (charge au lac en 1981)	0.24	0.23	0.11

Les valeurs obtenues pour le Lac de Neuchâtel sont donc proches de celles du lac Superior (R1(P)=1.34[mg/m²*j] à Chez-le-Bart et 2.41[mg/m²*j] sur les tombants), mais les charges qui parviennent au lac sont d'un ordre de grandeur plus élevées dans le cas de Neuchâtel.

¹ Le rapport est entaché d'une erreur: ce sont 180[t/an] et non 136[t/an] qui peuvent être déduites du calcul de bilan.

Il est encore nécessaire de préciser que cette évaluation du flux resuspendif de phosphore ne concerne que le phosphore sous forme particulaire. Or une part non négligeable du phosphore contenu dans le sédiment de surface est probablement remobilisée sous forme dissoute par diffusion à l'interface eau-sédiment. Une évaluation du relargage dans la colonne d'eau de phosphore dissous en provenance du sédiment de surface serait utile afin de mieux appréhender l'importance réelle de la remise en suspension de phosphore particulaire. Ces chiffres ne sont malheureusement pas à notre disposition.

L'influence de ce flux resuspendif de phosphore particulaire sur l'activité phytoplanctonique apparaît quant à elle plus difficile à percevoir. Il a été montré que la fraction de phosphore extractible par NaOH 0.1N est directement disponible pour les diatomées (Williams et al. 1980). Pour les lacs Michigan et Ontario, cette part oscille entre 15 et 45% du phosphore total dans le matériel issu de resuspensions (Charlton 1983; Eadie et al. 1984; Eadie et al. 1990). Cette part est donc inférieure à ce qui est admis pour les apports directs au lac, soit environ 50% (Eadie et al. 1990). La relation temporelle entre resuspension et initiation du bloom printanier apparaît d'une importance cruciale dans l'efficacité de la capture des sels nutritifs par le plancton.

Si nous ne disposons pas des données de phosphore facilement extractible pour le Lac de Neuchâtel, nos résultats laissent tout de même apparaître que les resuspensions doivent avoir une influence non négligeable sur le recyclage des nutriments et en particulier sur le recyclage du phosphore.

4.4.9.8. Discussion générale

Les arguments invoqués en faveur d'une importance non négligeable de la resuspension dans le régime sédimentaire du Lac de Neuchâtel sont divers et complémentaires. Revenons aux questions que nous nous sommes posées au début de ce paragraphe 4.4.9.:

1. Quel est le schéma général, quand, où et avec quelle intensité a lieu la resuspension de sédiment?
2. Comment se caractérise sa relation avec l'intensité du vent? - Y a-t-il une relation entre l'état de la stratification thermique et la resuspension? - Quelles conclusions peut-on tirer sur l'hydrodynamisme?
3. Comment le sédiment remis en suspension est-il transporté?
4. Est-il possible de proposer un modèle de la resuspension?

1. Quand le processus de remise en suspension est-il actif?

Nos conclusions précédentes stipulent que ce processus est plus actif durant la période non stratifiée que durant la période stratifiée.

Cependant plusieurs faits indiquent que la resuspension n'est pas inexistante en été et qu'elle constitue une part non négligeable des flux sur les tombants (cf. 4.4.8. et 4.4.9.1.).

Dans la zone profonde, l'influence de resuspensions n'est pratiquement pas perceptible en été, les flux sont constants en fonction de la profondeur et la composition du matériel ne varie pas avec l'intensité du flux total. Le fait que les charges en suspension ne sont pas plus élevées sur les tombants que dans la plaine (Tab.4.6.) peut à cet égard paraître étonnant. Il faut toutefois considérer le fait que l'échantillonnage n'a pas été effectué lors de périodes de tempêtes ainsi que la possibilité que les particules en suspension soient relativement rapidement évacuées de la colonne d'eau, échappant ainsi à notre analyse. D'autre part, le fait que la resuspension soit pratiquement indiscernable à la station de Chez-le-Bart peut paraître étonnant du fait de l'existence de la BNL estivale avec des turbidités de l'ordre de 0.3-0.4FTU contre des valeurs inférieures à 0.1FTU dans le reste de l'hypolimnion. Il faut toutefois admettre que les charges moyennes (en mg/l) mesurées dans la BNL ne sont que d'environ 10% supérieures à celles de 75m de profondeur (Tab.4.6.) et que cette différence BNL-75m est la plus faible des 4 saisons. Dans le lac d'Hallwil, Bloesch & Uehlinger (1986) ont mesuré des concentrations en matière particulaire plus élevées dans la BNL mais pas non plus de flux significativement plus élevés que dans le reste de l'hypolimnion. Ils postulent que les particules remises en suspension sont de petite taille et qu'elles possèdent des vitesses de chute si faibles qu'elles ne contaminent pas les pièges situés à proximité du fond de manière sensible. Nos analyses indiquent également que les particules présentes dans la BNL sont de taille légèrement inférieure au reste de l'hypolimnion, la différence étant toutefois à peine perceptible (Fig.4.9.).

En automne, les flux augmentent fortement, en début de saison uniquement sur les tombants et ensuite à la station de Chez-le-Bart. Nous avons pu montrer que la majeure partie de ces flux est d'origine resuspendive.

En hiver, les flux resuspendifs atteignent leurs valeurs maximales dans la zone profonde et des valeurs similaires à celles de l'automne sur les talus. Le printemps est quant à lui marqué par une forte diminution de la resuspension, du fait probablement de l'établissement de la stratification printanière qui, bien que sujette à de fortes perturbations en début de printemps, peut apparaître dès le début du mois de mars.

2. Quelle est la relation entre les vents et le flux resuspendif? Quelle est l'influence de la stratification et quelles conclusions tirer sur l'hydrodynamisme?

Le rapport entre le flux resuspendif à l'interface eau-sédiment (J_0) et l'intensité du vent (appréciée par l'intermédiaire de la distance parcourue par les vents d'intensité supérieure à 2m/s) peut être utilisé comme estimation de l'efficacité indirecte des vents à remettre en suspension les particules à la station considérée (Fig.4.47.). Il faut pour cela postuler que J_0 reflète bien le flux vertical in situ, à l'interface eau-sédiment de la station considérée, et non un flux relatif à des apports latéraux. Nous avons testé cette hypothèse de différentes manières; premièrement par un calcul de bilan qui nous montre que la production sur le plateau en été ne peut expliquer les flux enregistrés durant la période hivernale et donc que les transferts latéraux depuis les zones périphériques peu profondes ne constituent pas le mécanisme dominant; en second lieu par la composition du matériel récolté qui se rapproche de celle du sédiment de surface de la station considérée.

S'il est clair que des courants de turbidité existent, il paraît peu probable qu'ils aient une périodicité telle que celle rencontrée au niveau des flux. De plus, la similarité des signatures automnales des flux des stations de Cortaillod et de Chevroux peut difficilement s'expliquer par ce type d'événements.

Si on accepte que le flux J_0 est caractéristique du flux resuspendif vertical à l'interface eau-sédiment, la variation du rapport J_0/I_{vents} ne peut à notre avis s'expliquer que par des caractéristiques hydrodynamiques générales. Dans la zone profonde, à la station de Chez-le-Bart, le rapport J_0/I_{vents} est typiquement faible en été - excepté en juin 1994 - et élevé d'octobre-novembre à mars-avril environ. Cette périodicité peut donc simplement s'expliquer par la variation d'intensité du contraste thermique. Il est en effet largement admis que le rapport entre intensité des courants de fond et de ceux de surface est plus élevé durant la période non stratifiée que durant la période stratifiée, et ceci se signale également au niveau de la modélisation numérique (Besson, comm. pers.). Il semble donc que pour le lac de Neuchâtel, les courants de fond de la zone profonde ne sont pas assez intenses pour remettre en suspension de manière importante le sédiment durant la période stratifiée et que la limite critique est atteinte lors de l'affaiblissement de la stratification thermique, en octobre ou en novembre. Ce constat diffère de celui que l'on peut faire concernant les grands lacs américains où la resuspension est active durant l'été dans la zone profonde (Eadie et al. 1990). Le facteur de forme (rapport entre dimensions horizontales et verticale) de ces lacs est nettement plus élevé que celui du lac de Neuchâtel, ce qui entraîne probablement l'existence de courants hypolimniques plus élevés.

Sur les tombants, la situation est similaire à celle de la zone profonde durant l'été avec un rapport J_0/I_{vents} généralement très faible. Ceci s'expliquerait donc de la même manière, par une isolation entre l'épilimnion et la zone de 40m, qui correspond à la partie supérieure de l'hypolimnion. Aux valeurs très élevées de ce rapport durant les 3 automnes étudiés correspond la situation d'approfondissement et d'affaiblissement de la zone de contraste thermique. La zone de 40m de profondeur est située en base de thermocline au début de l'automne et en base d'épilimnion vers la fin de la même saison. D'après la modélisation numérique des courants, la zone de la base de l'épilimnion et de la thermocline est une zone où les courants sont activés (Besson, comm. pers.), en quelque sorte canalisés par la zone de contraste de densité. Lorsque la stratification thermique disparaît, cette "canalisation" des courants disparaît également, les courants devenant alors répartis de manière plus uniforme sur la colonne d'eau (Besson, comm. pers.). D'autre part, les ondes internes sont générées au niveau de la thermocline et leur oscillation y provoque des courants de turbulence importants. Plusieurs auteurs attribuent un fort pouvoir resuspendif aux courants générés lors de l'oscillation des ondes internes (Mortimer 1971; Chambers & Eadie 1981).

Ces potentielles caractéristiques courantométriques concordent avec nos résultats, les rapports J_0/I_{vents} des tombants étant maximaux lorsque la zone de 40m de profondeur se trouve au niveau de la thermocline ou de la base de l'épilimnion et les mêmes rapports devenant comparables à ceux de la station de Chez-le-Bart lorsque la stratification thermique disparaît.

A noter que lors de l'étude de l'évolution spatio-temporelle de la turbidité, nous n'avons rencontré qu'un seul exemple de resuspension au niveau de la thermocline (6.12.94; Fig.4.35.).

3. Est-il possible de caractériser la manière dont se fait le transport? D'où provient le matériel récolté - resuspension locale ou apport latéral? - et comment est-il transporté?

ETE

La resuspension n'affecte de manière sensible que les tombants. Plusieurs faits semblent indiquer que la resuspension n'est pas uniquement d'origine locale mais qu'elle parvient en partie aux tombants par des apports latéraux depuis les zones peu profondes du plateau lacustre. A part la période du 2-29.7.93, les flux des stations des tombants ne montrent pas d'augmentation exponentielle à l'approche du fond mais ont une allure plus ou moins constante en fonction de la profondeur. La composition du matériel se rapproche pourtant de la composition moyenne de la station considérée à 30m et à 35m de profondeur, ce qui implique logiquement une origine locale de la resuspension. Toutefois, à 10m et 20m, les flux sont plus élevés que ceux auxquels on pourrait s'attendre d'après l'évolution de la chimie de l'eau (Fig.4.22.), excepté en 1994, et la composition du matériel, à plus de 80% carbonaté (Fig.4.17.) ne peut s'expliquer par une origine locale de la resuspension. Les particules sont donc probablement remises en suspension sur le plateau (teneur moyenne en carbonates des carottes issues des beines de Cortaillod et de Chevroux: 80.3%) et transportées au sein de l'épilimnion. Ceci est partiellement confirmé par l'étude de l'évolution spatio-temporelle de la turbidité, qui indiquerait que tant que la stratification thermique est établie, les particules remises en suspension sont transportées principalement au sein de l'épilimnion.

AUTOMNE ET HIVER

La composition du matériel récolté se rapproche de la composition du sédiment de surface de la station considérée avec l'augmentation du flux sédimentaire. En second lieu, la quantité de sédiment déposé sur le plateau lacustre durant l'été ne permet pas d'expliquer l'importance des flux de la période hivernale, autrement dit il est nécessaire de postuler une autre source de matériel, qui ne peut provenir que des zones plus profondes du lac.

En début d'automne (périodes du 2.9.-13.10.93, 20.9.-18.10.94 et 18.10.-7.11.94), les flux sont faibles et constants avec la profondeur à Chez-le-Bart, ils sont faibles en surface mais sont en forte augmentation à 30 et 35m à Cortaillod ainsi qu'à Chevroux.

La resuspension affecte fortement les stations des tombants. Par contre, elle est encore très faible à la station de Chez-le-Bart. La stratification thermique étant encore bien établie (contraste de température: 5-10°C), la resuspension est confinée à la partie supérieure de la colonne d'eau et n'affecte pas directement les zones profondes du lac.

Ceci est confirmé par l'étude du suivi de la turbidité qui montre des évidences de resuspension uniquement au niveau de la couche épilimnique tant qu'un contraste thermique existe et un transport des particules au sein de cette couche.

D'après les résultats de l'estimation des coefficients de diffusion turbulente, le mélange vertical se réalise encore mal durant cette période, et ce également au niveau des tombants, ce qui est peut-être imputable au fait que les stations des tombants se trouvent encore au-dessous de la limite épilimnion-thermocline, donc dans la zone où le mélange vertical est généralement considéré comme minimal.

Durant la seconde partie de l'automne (périodes du 13.10.-10.11.93, 10.11.-3.12.93, 7.11.-24.11.94 et 24.11.-19.12.94), les flux sont faibles en surface à Chez-le-Bart mais augmentent à proximité du fond, ils sont faibles en surface mais en forte augmentation à 30 et 35m à Cortaillod ainsi qu'à Chevroux. Les flux sédimentaires de la station de Chez-le-Bart indiquent que les resuspensions dans la zone profonde sont possibles.

D'après les estimations des valeurs du coefficient de diffusion verticale, le mélange vertical est mieux réalisé en fin d'automne qu'en début de saison, la part du flux J_0 parvenant dans les 20m supérieurs de la colonne d'eau devenant plus importante.

En hiver (périodes du 3.12.-3.1.94, 3.1.-1.2.94, 1.2.-8.3.94, 19.12.-31.1.95 et 31.1.-24.3.95), les flux sont élevés en surface à Chez-le-Bart et augmentent avec la profondeur mais de manière plus modérée qu'en automne. Le même schéma est valable à Cortaillod ainsi qu'à Chevroux. Le contraste de température entre la surface et le fond est très faible en début de période (3°C au maximum début décembre 1993, ainsi que mi-décembre 1994) et peut être considéré comme nul dès la mi-janvier. Les profils des flux sédimentaires indiquent que la resuspension est d'intensité à peu près équivalente dans la zone profonde et sur les tombants. La resuspension a donc lieu à toute profondeur d'eau, ce qui est confirmé par l'étude de la turbidité. Les coefficients de diffusion verticale sont maximaux, le mélange vertical est donc efficace et la part du flux J_0 parvenant dans les 20m supérieurs de la colonne d'eau est également maximale. Ceci est également confirmé par l'étude de la turbidité, les variations latérales de turbidité étant du même ordre de grandeur que ses variations verticales durant les périodes de tempêtes (Fig.4.39.).

Nous avons déjà mentionné que les stations de Cortaillod et de Chevroux montraient certaines différences qui se retrouvent pour certaines d'entre elles de manière pratiquement systématique;

- les flux sédimentaires à 30m sont en moyenne plus élevés à Chevroux
- à 10m de profondeur, les flux sédimentaires sont moins élevés à Chevroux qu'à Cortaillod, mais ils augmentent plus rapidement avec la profondeur, cette caractéristique ayant pour conséquence un résultat plus modéré au niveau des coefficients de diffusion à Chevroux
- la composition du sédiment est plus carbonatée à Chevroux.

La différence de composition peut simplement s'expliquer par l'éloignement plus important de la station de Chevroux de toute source d'apport détritique. Le fait que les flux sédimentaires augmentent plus fortement à Chevroux est plus intrigant. Notre hypothèse est que cette caractéristique reflète un trait de la circulation générale du lac. Le vent d'ouest étant le vent dominant (76% de vent d'ouest contre 24% de bise dans la somme des vents de SW et de NE de plus de 2m/s en moyenne journalière: période mai 92 à mars 95), on peut donc imaginer que la rive droite du lac soit une zone préférentielle de downwelling, et la rive gauche une zone préférentielle d'upwelling. Lors de la campagne du 24.1.95 qui a été marquée par un régime tempétueux d'ouest, la turbidité est en forte augmentation avec la profondeur dans le bassin SE, alors qu'elle est répartie de manière plus uniforme dans la colonne d'eau dans le bassin NW (Fig.4.39.). Nous en avons conclu que la resuspension était préférentiellement maintenue dans la zone profonde par un courant de downwelling dans le bassin SE, et répartie dans la colonne d'eau par un courant d'upwelling dans le bassin NW. La Figure 4.49. présente un test de l'hypothèse que la répartition des particules trace cette caractéristique éventuelle de la circulation générale. Nous avons donc divisé le flux à 35m de profondeur par celui de 10m de profondeur pour chacune des deux stations, divisé le résultat de Chevroux par celui de Cortaillod et testé si le quotient obtenu montre une dépendance vis à vis de la différence entre somme des vents d'ouest supérieurs à 2m/s et somme des vents d'est supérieurs à 2m/s. Une certaine tendance existe (Fig.4.49.A), et varie au cours des saisons (Fig.4.49.B-D). La pente de la droite de régression diminue du début de l'automne à l'hiver, ce qui peut être relié à l'augmentation des coefficients de diffusion verticale au cours de cette période.

Le fait que les coefficients de diffusion verticale estimés sont plus élevés à Cortaillod qu'à Chevroux ne traduirait donc pas une réalité au niveau du processus de diffusion turbulente mais refléterait plutôt une caractéristique de la circulation générale, en quelque sorte en ajoutant une vitesse de chute supplémentaire à Chevroux et en diminuant la vitesse de chute à Cortaillod.

Dans le même ordre d'idée, le fait que les flux sont en moyenne plus élevés à 30m à Chevroux qu'à Cortaillod est probablement dû à des courants en moyenne plus importants le long du tombant SE, les courants étant généralement plus intenses dans la zone sous le vent du lac que dans la zone au vent. On pourrait arguer que le plateau SE est plus large que le plateau NW et que de ce fait les apports latéraux du plateau vers le tombant SE pourraient être plus importants. Le principal argument à l'encontre de cette hypothèse est la contribution apparemment prépondérante de la resuspension locale.

En ce qui concerne la diminution estivale des flux sédimentaires à 30m de profondeur à Cortaillod, on pourrait invoquer la possibilité d'une rétention des particules. Rosa (1985) propose un tel scénario pour expliquer la diminution de 23% des flux entre la base de l'épilimnion et le sommet de l'hypolimnion dans le lac Ontario. Le problème dans notre cas est qu'aucune augmentation des charges en suspension n'est observée au cours de la saison dans l'épilimnion, alors que pour une période d'environ 4 mois on devrait observer une augmentation des

charges de plus de 20mg/l sur une colonne de 10m d'épaisseur pour expliquer une diminution de $2[g/m^2 \cdot j]$ des flux entre 10 et 30m de profondeur. Il s'agit donc vraisemblablement à nouveau d'un problème hydrodynamique qui est peut-être à mettre en relation avec une localisation prépondérante des zones d'upwellings le long du talus NW, compensant partiellement les vitesses de chute des particules, celles-ci étant alors en partie transportées latéralement vers le large.

4. Modèle interprétatif

Nous avons rassemblé les constatations principales de cette étude de la resuspension en un modèle interprétatif (Fig.4.50.). Son développement se suit saison après saison:

- A) ETE: resuspensions limitées avant tout au plateau lacustre, transport des particules au sein de l'épilimnion. Resuspension quantitativement négligeable dans les zones profondes. La stratification empêche un bon couplage entre les courants de surface et ceux de fond.

- B1) DEBUT D'AUTOMNE: les zones sujettes à des remises en suspension de sédiment s'étendent aux tombants qui subissent les flux resuspendifs maximaux de l'année entière alors que la resuspension reste négligeable dans la zone profonde. Interprétation: la canalisation des courants ou l'influence des ondes internes au niveau de l'interface épilimnion-hypolimnion provoque une resuspension maximale sur les tombants alors que le contraste thermique reste encore assez important pour empêcher un bon couplage entre courants de surface et de fond. Transport des particules au sein de l'épilimnion et de la thermocline, mélange vertical très mal réalisé.

- B2) FIN D'AUTOMNE: mêmes constatations et interprétations que pour B1), excepté que la resuspension commence à être quantitativement importante dans la zone profonde. Interprétation: le contraste thermique amoindri permet un meilleur couplage entre courants de surface et de fond. D'autre part, le mélange vertical se réalise mieux.

C) HIVER: la resuspension devient aussi importante quantitativement dans les zones profondes que sur les tombants, le contraste thermique ayant disparu. Le mélange vertical est maximal, procédant essentiellement par mélange convectif de la colonne d'eau.

D) PRINTEMPS: resuspension en forte diminution aussi bien sur les tombants que dans les zones profondes. Interprétation: l'établissement de la stratification printanière isole rapidement la couche hypolimnionique. Le mélange vertical est à nouveau plus mal réalisé.

E) L'influence d'un possible régime hydrodynamique préférentiel, caractérisé par des domaines de downwelling au SE et d'upwelling au NW issus de la prépondérance du vent d'ouest, permet d'expliquer les différences de caractéristiques des flux sédimentaires de Cortaillod et de Chevroux. Conséquence: les particules remises en suspension parviennent plus facilement dans la couche épilimnionique du côté NW que du côté SE.

4.4.9.9. Comparaison avec d'autres lacs

Les études des processus de resuspension en milieu lacustre ne sont pas rares. En ce qui concerne les grands lacs, la plupart d'entre elles se concentrent sur les grands lacs américains. Les études comparatives sur plusieurs grands lacs sont inexistantes contrairement à ce qui s'est fait pour les lacs de plus petite taille, avec en particulier les études de Hilton (1985) et de Evans & Håkanson (1992). Quatre processus responsables de la redistribution du sédiment ont été identifiés dans les lacs de petite taille: le slumping, le mélange périodique complet du lac, l'action des vagues sur le littoral et la redistribution par les vagues sur le plateau. Dans les grands lacs, les processus littoraux sont moins importants, le mélange saisonnier complet du lac et les ondes internes étant les facteurs dominants (Chambers & Eadie 1981). Ces études concluent d'autre part que les paramètres les plus importants pour décrire l'importance de la resuspension sont la surface du plan d'eau et sa profondeur maximale. Etant donné les données extrêmement lacunaires à disposition pour les grands lacs, il paraît hors de portée de tenter de soupeser l'importance des différents paramètres susceptibles d'entrer en ligne de compte dans la resuspension.

Le facteur de forme (rapport des dimensions verticale et horizontale) apparaît déjà intuitivement extrêmement important. Il va en effet en grande partie décider de la possibilité ou non du mélange total hivernal. D'après notre étude, si le mélange total a lieu, il y a également possibilité d'une remise en suspension locale du sédiment dans la zone profonde. Ceci se vérifie dans les grands lacs américains où le mélange complet a lieu chaque hiver et où la plus grande partie du matériel récolté en hiver dans la zone profonde provient de resuspensions.

S'il n'a pas lieu, la resuspension peut se produire dans les zones peu profondes mais pas dans la zone profonde, à moins que le facteur de forme soit extrêmement faible, du type de celui des grands lacs américains (lac Michigan: $Z_{max}=282m$, $A=57750km^2$) où le sédiment est apparemment remis en suspension dans la zone profonde même durant la période stratifiée. Dans le lac de Zoug, par exemple, la resuspension est apparemment très faible en hiver dans la zone profonde (Bloesch & Sturm 1986), le lac ne subissant pas de mélange complet ($Z_{max}=198m$, $A=38.2km^2$). Dans le lac d'Hallwil (Bloesch & Uehlinger 1986), qui subit un mélange complet une ou deux fois tous les dix ans ($Z_{max}=47m$, $A=10km^2$), la resuspension estivale est élevée dans la zone peu profonde mais extrêmement faible dans la zone profonde (environ 2% de matériel provenant de resuspensions). En hiver, environ 20% du matériel récolté dans la zone profonde provient de resuspensions.

Ces quelques résultats viennent confirmer que l'intensité et la localisation de la resuspension sont fonction de l'état de la stratification thermique, l'existence du mélange saisonnier complet déterminant la possibilité de remise en suspension du sédiment dans la zone profonde, à moins que le facteur de forme soit extrêmement petit, l'avènement du mélange saisonnier étant par ailleurs déterminé en grande partie par le facteur de forme.

Dans plusieurs études, la différence entre les flux de la zone littorale ou des tombants et ceux de la zone profonde s'est révélée maximale durant la période automnale d'affaiblissement de la stratification thermique (Bloesch 1982; Rosa 1985), les flux étant par ailleurs souvent maximaux durant la même période dans la zone peu profonde et dans la zone des tombants (Bloesch 1982; Rosa 1985). Dans le cas du lac Michigan (Eadie et al. 1984) les flux sont parfois maximaux sur les tombants par rapport à la fois aux stations de berge et de plaine profonde. Cela suggère une resuspension locale plus importante sur les tombants qu'ailleurs, ce qui, comme dans le cas du lac de Neuchâtel, pourrait être dû à des courants de fond plus importants dans cette zone, de par la "canalisation" des courants à l'interface épilimnion-hypolimnion. On peut également se demander si les ondes internes provoquent des courants plus importants au niveau de l'interface épilimnion-hypolimnion.

Il est donc probable que dans les grands lacs relativement profonds, il n'y ait pas d'influence prépondérante d'apports latéraux consécutifs à la resuspension par les vagues dans la zone peu profonde. La majeure partie des flux mesurés provient probablement avant tout de resuspensions locales dont l'intensité est fortement déterminée par l'état de la stratification thermique.

4.4.9.10. Comparaison des taux de sédimentation avec ceux déduits de l'analyse des sédiments récents

Cette comparaison est présentée au Tableau 4.9. Les flux resuspensifs sont déduits de l'estimation du pourcentage de resuspension pour les périodes où ce calcul a été établi, de la différence entre flux hypolimnique et flux épilimnique dans les autres cas, excepté sur les tombants en été où le flux R1 a été pris en compte. D'après ces calculs, le pourcentage de resuspension évolue de 20-50% au printemps et en été à plus de 70% en automne et en hiver. Alors que le flux total est nettement plus élevé sur les tombants que dans la plaine, l'inverse devient vrai en ce qui concerne le flux net estimé. Les valeurs obtenues par Bapst (1987) pour une station de plaine profonde située au large de Serrières, soit 4.2[g/m²*j], sont assez proches des valeurs du flux total à Chez-le-Bart (4.84[g/m²*j]). Il faut cependant mentionner que Bapst a basé son estimation de flux sédimentaire annuel uniquement d'après une expérimentation sur une période estivale d'environ 2 mois, en 1986. Les flux enregistrés lors de son expérimentation (6.8-8.45[g/m²*j]) sont plus élevés que durant n'importe quelle période estivale de notre étude (2.11-4.46[g/m²*j]) en tenant compte du fait qu'il s'est également agi d'une station de plaine profonde. Ce fait est peut-être lié à la réoligotrophisation du lac qui est susceptible d'avoir entraîné une diminution de la précipitation de calcite.

	Chez-le-Bart (g/m ² *jour)	Cortailod (g/m ² *jour)	Chevroux (g/m ² *jour)	BAPST (1987) (g/m ² *jour)
flux total automne + hiver	6.23	8.55	10.43	
dont flux resuspensif	4.42	6.98	9.64	
% de flux resuspensif	70.9	81.6	92.4	
flux net estimé	1.81	1.57	0.79	
flux total printemps+été	3.45	3.72	4.85	
dont flux resuspensif	0.80	0.91	2.35	
% de flux resuspensif	23.1	24.4	48.4	
flux net estimé	2.65	2.81	2.50	
flux total annuel (92-95)	4.84	6.13	7.64	4.2
dont flux resuspensif	2.61	3.94	5.99	
% de flux resuspensif	53.9	64.3	78.4	
flux net estimé	2.23	2.19	1.65	
flux total annuel (g/cm ² *an)	0.177	0.224	0.279	0.153
flux net annuel (g/cm ² *an)	0.082	0.080	0.060	
flux net annuel (mm/an)	1.254	1.230	0.925	2.360
tx d'accum.séd.86-93 (g/cm ² *an)	0.160	0.136	0.103	
tx d'accum.séd.86-93 (mm/an)	2.462	2.092	1.585	
tx d'accum.séd.52-93 (g/cm ² *an)	0.099	0.084	0.063	
tx d'accum.séd.52-93 (mm/an)	1.523	1.292	0.969	

Tab.4.9. Comparaison entre les flux totaux, les flux nets estimés et le taux d'accumulation estimé d'après l'analyse des sédiments récents

Nous avons calculé les taux d'accumulation aux 3 stations considérées en nous basant sur les taux d'accumulation déduits de la carotte C37 (137-Cx et 210-Pb; Fig.5.18.) et sur les corrélations (d'après Clot et pic de calcite).

Fig.5.7.) entre C37 et C20 pour la station de Chez-le-Bart et C16 pour la station de Chevroux. Pour la station de Cortaillod nous avons utilisé une moyenne des valeurs obtenues pour les carottes C8 et C21, les contenus en talc et en carbone total de la carotte C12 n'ayant pas été analysés. Si on compare les flux totaux (nets + resuspendifs) avec les taux d'accumulation déduits des carottes, on s'aperçoit que les flux totaux des tombants sont nettement trop élevés et que pour la station de Chez-le-Bart, il y a accord entre les deux mesures si on considère le taux d'accumulation estimé pour la période 1986-1993. Il est toutefois fort possible que ce taux d'accumulation soit surestimé. Le taux d'accumulation 1986-93 de $0.196[\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{an}]$ (C37) paraît en effet élevé en regard du taux 1964-86 de $0.099[\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{an}]$.

Si on compare les flux nets estimés et la moyenne du taux de sédimentation depuis les années 1960, on obtient un excellent accord, excepté pour la station de Chez-le-Bart où le pourcentage de resuspension est peut-être légèrement surestimé.

4.4.9.11. Implications générales de la resuspension dans le lac de Neuchâtel

La réinjection de matière particulaire dans la colonne d'eau a deux effets, celui de favoriser l'élimination de nouveaux contaminants à affinité particulaire élevée et celui de recycler les contaminants qui avaient déjà auparavant été sédimentés.

PCB, mirex, dioxines et métaux lourds peuvent être hydrophobes, non dégradables, toxiques. Ils possèdent une grande affinité avec la matière particulaire (Rosa 1985). Les métaux lourds sont fortement associés chimiquement avec la matière particulaire en suspension (Rosa et al. 1983), spécialement avec les particules fines (Forstner & Patchineelam 1980). L'adsorption rapide des PCB sur la matière particulaire a également été montrée (Clayton et al. 1977; Tulp & Hutzinger 1978). Le zooplancton est soumis à des niveaux de contamination plus élevés si des détritiques sont ajoutés à l'eau (McNaught 1982).

Le recyclage du phosphore par la resuspension apparaît comme un phénomène important même si tout le phosphore remis en suspension n'est pas assimilable par le phytoplancton.

Concernant les études paléoenvironnementales, la resuspension a une influence dans la mesure où elle va procéder à une certaine homogénéisation du sédiment. Elle constitue un facteur parmi d'autres - bioturbation notamment - qui pourra empêcher la formation de laminations saisonnières.

Une des questions à se poser encore est de savoir si la resuspension entraîne l'existence de sites privilégiés de sédimentation. Notre étude des sédiments de surface (Chapitre 5) n'apporte pas de réponse convaincante à ce sujet. Il serait également intéressant d'étudier plus attentivement l'influence de la resuspension sur l'élimination et le recyclage des contaminants de manière générale.

4.4.10. Etude de la sédimentation des pollens

L'analyse pollinique du matériel récolté dans les pièges à sédiments a été entreprise par Pascale Ruffaldi (Laboratoire de chrono-écologie, Université de Franche-Comté, Besançon) d'une part dans le but de mieux comprendre la dynamique de la sédimentation des pollens dans un grand lac et notamment d'appréhender leur vitesse de sédimentation en comparant la période de pollinisation avec les récoltes dans les pièges ainsi que de voir si une sédimentation différentielle a lieu en fonction de l'éloignement des rives et de la profondeur. D'autre part, cette étude a également pour but de vérifier l'éventualité de disparités spatiales dans la sédimentation des pollens. Les études palynologiques effectuées sur carottes courtes ont en effet donné des résultats très différents du point de vue des proportions relatives des différents taxons d'espèces arborescentes; la carotte C19c prélevée par 55m d'eau au large de Chevroux (O.Puertas, Laboratoire de chrono-écologie, Besançon; Fig.5.23.) présente des proportions de pollens d'épicéa et de pin élevées (jusqu'à 35%) et des proportions faibles de pollens de hêtre (quelques %); la carotte LN01, prélevée par 130m d'eau dans le bassin de Neuchâtel (Ph.Hadorn, Service cantonal d'Archéologie, Neuchâtel) ne présente quant à elle que de très faibles taux de *Picea* (10 à 15% au plus) et une plus grande importance du hêtre (*Fagus*, env. 10%). Il nous est donc apparu intéressant de tenter d'appréhender l'origine de ce phénomène par l'analyse des pollens de différentes stations de pièges à sédiments, de vérifier si cette disparité pouvait être due à un problème taphonomique. Le plateau lacustre connaît souvent une sur-représentation des pollens à ballonets (épicéa, pin et sapin essentiellement). Ceci est dû au fait que ces grains sont hydrophobes, ce qui entraîne une flottaison prolongée (Aimann 1994).

Les données des analyses aéropalynologiques nous ont été fournies par Bernard Clot, du Laboratoire de phanérogamie de l'Institut de botanique de l'Université de Neuchâtel. Le capteur est situé sur le toit de l'Institut, en zone urbaine, ce qui explique que certaines espèces soient sur-représentées par rapport à leur importance régionale (*Platanus*, *Cedrus*, *Ginkgo*, etc.). Les résumés de ces analyses et qui concernent plus spécialement les pollens allergéniques sont publiés (Clot 1993; Clot 1994).

4.4.10.1. Rapports entre période de pollinisation et récolte dans les pièges

Un résumé des résultats de la station de Chez-le-Bart est présenté aux Figures 4.51. (1993) et 4.52. (1994). Plusieurs échantillons se sont révélés stériles: 10.8.94: 100m; 18.10.94: 50m et 24.11.94: 50, 75 et 115m (période non représentée sur la Fig.4.52.). Cette observation, également valable pour des échantillons d'autres périodes à Cortaillod et à Chevroux, n'a pas trouvé d'explication satisfaisante.

Chapitre 4: Sédimentation actuelle

Les taxons principaux sont présents toute l'année dans le matériel récolté. La représentation de ces taxons ne varie fortement que lors de leur période de pollinisation. De manière générale, le décalage entre la période de pollinisation des taxons arborescents et leur représentation maximale dans les pièges est égal ou inférieur à un mois, quelle que soit la profondeur à laquelle est situé le piège:

- *Alnus*, *Taxus* et *Corylus* sont fortement représentés dans les pièges de février à avril (*Alnus*: 10-35% du 2.2. au 20.4.93, 5-25% durant la même période de 1994, 10-25% du 31.1. au 24.3.95, contre moins de 10% durant les autres périodes), ce qui correspond à la période de pollinisation de ces taxons (mi-janvier à mi-mars).
- *Betula* et *Fraxinus* sont fortement représentés de mars à mai dans les pièges, ce qui dans ce cas également correspond à la période de pollinisation (mi-mars à début mai en 1993 et fin mars à début mai en 1994). A noter que les plus fortes représentations de *Populus* se retrouvent aux mêmes périodes. La pollinisation de cette espèce est pratiquement synchrone à celle des deux autres taxons.
- la correspondance entre la période de pollinisation et la récolte de *Quercus* et de *Fagus* peut être appréciée à la station de Cortaillod (Fig.4.53.), les lacunes de la station de Chez-le-Bart rendant cette appréciation impossible. Ces deux taxons laissent apparaître une représentation maximale dans les pièges du 21.4. au 24.5.94 et du 24.5. au 1.6.94, ce qui correspond à un décalage inférieur à un mois par rapport à la période de pollinisation (fin avril-début mai).
- l'importance de *Pinus* est maximale à Cortaillod durant les périodes du 21.4. au 24.5.94 et du 24.5. au 1.6.94. Il y a donc ici aussi un décalage inférieur ou égal à un mois par rapport à la période de pollinisation qui couvre le mois de mai.
- les périodes de pollinisation de *Picea* et d'*Abies* ne sont pas reconnaissables dans les pièges. De plus les fréquences de ces deux taxons sont les plus élevées en automne-hiver sur les tombants, et en hiver dans la plaine. *Pinus* est presque toujours bien représenté et également parfois mieux en hiver qu'au printemps ou en été.
- les pollens non arboréens présentent une importance maximale de juin à septembre avec des valeurs qui dépassent souvent 50%, période qui également correspond à la pollinisation avec un mois de décalage au plus.

Les périodes de pollinisation des taxons principaux se reconnaissent donc par des maxima de représentation dans les pièges. Le décalage entre pollinisation et récolte dans les pièges est faible, d'un mois au maximum. Il n'y a pas de réelle indication d'un temps de résidence plus long des pollens à ballonets. Seules les valeurs élevées de *Taxus* et de *Betula* à 10m et 20m à Chez-le-Bart durant les périodes du 24.11-19.12.94 et 19.12.94-31.1.95 posent problème étant donné que ces taxons ne pollinisent pas à cette période. Ces valeurs élevées ne se retrouvent pas à Cortaillod ni à Chevroux. Il est difficile de proposer une interprétation valable en ce qui concerne cette observation.

Le rapport temporel entre période de pollinisation et récolte dans les pièges donne quelques indications sur les vitesses de sédimentation des pollens. Pour la période du 20.4. au 11.5.93, par exemple, des proportions importantes de *Betula* (env.40%) se retrouvent à 10m comme à 120m de profondeur, alors que les maxima de pollinisation de ce taxon ont eu lieu du 15 au 30 avril. Durant cette même période, les trois taxons les plus représentés quelle que soit la profondeur correspondent aux trois taxons récoltés en plus forte abondance dans la pluie pollinique durant la deuxième quinzaine d'avril (*Platanus* excepté): *Betula*, *Fraxinus* et *Quercus*. *Alnus* et *Corylus* sont représentés de manière plus importante à proximité du fond qu'en surface et seraient donc en fin de sédimentation.

Nous sommes donc en présence d'une sédimentation rapide, inférieure ou égale à un mois, comparable à ce qui est observé au niveau de la moyenne des particules (Fig.4.13.).

4.4.10.2. Comparaison entre les différentes stations

Ces comparaisons sont présentées aux Figures 4.55., 4.56. et 4.57. Les résultats simultanés des trois stations sont uniquement disponibles lors de trois périodes (Fig.4.55.). Les diagrammes sont très semblables pour ces trois périodes, les taxons en cours de pollinisation présentent des fréquences équivalentes d'une station à l'autre. Les pollens à ballonets ne sont pas plus représentés sur les tombants qu'à Chez-le-Bart, excepté à Chevroux pour la période du 19.12.94 au 31.1.95. D'autres comparaisons peuvent être faites pour les périodes où nous disposons des données de deux des trois stations, Chez-le-Bart et Chevroux ou Cortaillod (Figs.4.56. et 4.57.). Les périodes automnales et hivernales semblent indiquer une proportion de pollens à ballonets plus importante sur les tombants, et ceci surtout en ce qui concerne *Picea* et accessoirement *Abies*. Les valeurs de *Pinus* et de *Picea* n'atteignent pourtant jamais celles retrouvées dans la carotte C19c.

En ce qui concerne le printemps et l'été (Fig.4.57.), les taxons en cours de pollinisation se retrouvent dans des proportions équivalentes à Chez-le-Bart et à Cortaillod.

Le fait qu'à part peut-être le problème des pollens à ballonets, aucune différence significative n'apparaisse d'une station à l'autre est attribuable à un enregistrement de la pluie pollinique de niveau régional (500m à 10km) (Ruffaldi 1996). En effet, la représentation des taxons liés aux milieux humides des bords du lac est faible (*Salix*, *Cyperaceae*, *Filipendula*) (Ruffaldi 1996) et les diagrammes ne reflètent pas l'état de la végétation de la rive la plus proche, en particulier à Chevroux, mais un état de la végétation au niveau régional. D'autres études sur pièges à sédiments ont montré que la majorité de la production pollinique de la zone littorale est très limitée dans sa dispersion vers le large (Bonny & Allen 1984; Marguier 1992). D'autres auteurs ont montré que les grands lacs

reçoivent une plus grande proportion de pollens de source régionale que de source locale (Berglund 1973; Jacobson & Bradshaw 1981).

Les faibles différences observées entre les trois stations de pièges ne permettent donc pas d'expliquer les disparités spatiales au niveau des sédiments récents.

4.4.10.3. Influence de la resuspension sur la sédimentation des pollens

Il est frappant de constater que durant la période automnale et du début de l'hiver la récolte de pollens dans les pièges est importante alors que les analyses néopalynologiques indiquent une absence de pollinisation à cette époque (Clot et al. 1995). De plus les diagrammes polliniques montrent une remarquable régularité à cette époque de l'année. Tous les taxons importants sont représentés dans des proportions qui rappellent celles du sédiment, avec une composition pollinique plus proche de celle de la carotte LN01 que de celle de C19c.

Deux hypothèses peuvent être avancées; soit la sédimentation d'une partie des pollens est très lente, soit l'effet de la resuspension est important. Plusieurs arguments parlent en faveur de la seconde hypothèse; d'une part les pollens des taxons en cours de pollinisation au printemps atteignent très rapidement les zones profondes du lac, dans un laps de temps inférieur ou égal à un mois, ce qui implique des vitesses de sédimentation de l'ordre de 4-5m/j au minimum. La récolte à 10m de profondeur en janvier ou février de pollens produits au printemps pose le problème suivant: ces grains ont au minimum 8 mois et n'auraient si on considère la première hypothèse parcouru durant ce laps de temps que la distance verticale de 10m, ce qui implique des vitesses verticales de l'ordre de 0.04m/j, soit une valeur de deux ordres de grandeur inférieure à ce qui a été conclu précédemment. D'autre part les flux de pollens établis d'après les quantités de grains par gramme de sédiment montrent des valeurs généralement supérieures durant la période automne-hiver par rapport à la période printemps-été (Fig.4.58.). Remarquez qu'à Chevroux, les flux augmentent fortement avec la profondeur en automne 1993. L'évolution saisonnière des flux de pollens moyennés sur la profondeur s'établit comme suit:

- Automne + hiver (grains/m²*j):
 - Chevroux: 30900
 - Cortaillod: 141100
 - Chez-le-Bart: 80900
- Printemps + été (grains/m²*j):
 - Chevroux: 7200
 - Cortaillod: 40000
 - Chez-le-Bart: 61500

Ces valeurs ne sont pas directement comparables d'une station à l'autre car elles prennent en compte des périodes d'exposition des pièges différentes. Elles confirment toutefois que les flux de pollens sont plus élevés durant la période hivernale que durant la période de pollinisation. La comparaison entre flux totaux de sédiment et flux de grains de pollens montre d'autre part une bonne correspondance entre les périodes de flux maximaux du sédiment total et des pollens (Fig.4.59.). Ceci indique donc clairement une forte influence de la resuspension.

Les concentrations absolues de pollens par gramme de sédiment sont présentées à la Figure 4.60. On constate également une forte variation d'une période à l'autre. Si des tendances d'évolution de la concentration avec la profondeur sont difficilement discernables, on peut tout de même généralement noter une forte augmentation de la concentration avec la profondeur en automne sur les tombants. Ceci indiquerait donc que les pollens sont remis en suspension depuis le fond et, le transport vertical étant encore faible à cette saison, sont relativement peu dispersés verticalement à travers la colonne d'eau.

Le cas des pollens à ballonets (*Pinus*, *Picea* et *Abies*) est intéressant à considérer. Leur proportion est souvent plus élevée sur les tombants qu'à Chez-le-Bart et cette différence semble d'autant plus importante en automne (Fig.4.56.: périodes du 2.9.-13.10.93 et du 20.9.-18.10.94 par exemple). Or nous avons postulé qu'à cette période de l'année, la resuspension est forte sur les tombants alors qu'elle n'atteint pas encore les zones profondes. Nous ne sommes malheureusement pas en mesure de comparer les flux de pollens à ballonets d'une station à l'autre, les mesures de concentrations absolues étant trop disparates. Il est toutefois possible de raisonner sur les flux de la station de Chevroux durant la période automnale 1993. On y observe généralement en effet une augmentation des proportions de pollens à ballonets avec la profondeur. Ces proportions peuvent être chiffrées en termes de flux et comparées au flux d'un ou de plusieurs autres taxons de pollens d'angiospermes. Les résultats de la période 29.7.-3.12.93 sont présentés à la Figure 4.61. Les flux sont faibles à 10m de profondeur, inférieurs à 1000[grains/m²*j] pour les 4 taxons représentés. Les flux à 35m sont par contre très élevés, entre 8000 et 25000[grains/m²*j] environ. D'autre part le rapport entre flux à 35m et flux à 10m diffère selon le type de pollen. Il s'établit à 45 pour *Pinus* et 120 pour *Picea*, contre 12 pour *Corylus* et 22 pour *Quercus*. Notre interprétation est donc que les pollens à ballonets sont susceptibles d'être remis en suspension plus facilement que les autres grains, ceci ne nous disant par ailleurs rien sur les temps de résidence dans la colonne d'eau des différents types de grains de pollens.

4.4.10.4. Discussion et conclusions

Le fait que la représentation des taxons liés aux lieux humides des rives du lac soit faible et qu'il y ait peu de disparité de composition entre les stations analysées permet de conclure que l'état de la végétation au niveau régional est enregistré. Ceci a évidemment son importance dans le cadre d'une étude paléoenvironnementale.

Tous les taxons principaux sont présents toute l'année dans le matériel des pièges. Leur représentation augmente lors de leur période de pollinisation. Le décalage entre période de pollinisation et récolte dans les pièges n'excède pas un mois, ce qui permet de conclure que la vitesse de chute des grains de pollens est relativement rapide et qu'elle avoisine celle de la moyenne des particules.

L'uniformité de la représentation et la présence de tous les taxons dans des proportions qui rappellent celles du sédiment durant l'automne et l'hiver est attribuable à l'influence de remises en suspension du sédiment. Ce processus est responsable des flux de pollens plus importants durant la période automne-hiver. D'autre part les pollens à ballonets ont une représentation plus importante sur les tombants que dans la zone profonde lors des épisodes de resuspension intense. Ce fait est attribuable soit à une remise en suspension relativement plus aisée de ces pollens par rapport aux autres grains dépourvus de ballonets, soit à un transfert de matériel riche en pollens à ballonets en provenance du plateau lacustre. De même, le fait que les concentrations absolues en grains de pollens soient plus élevées durant les périodes marquées par la resuspension pourrait indiquer que les pollens sont de manière générale remis en suspension plus facilement que les autres particules. Le fait que les flux de pollens et souvent même les concentrations absolues soient beaucoup plus élevés lors des épisodes de resuspension intense laisse présager que les flux sédimentaires de pollens dans le lac de Neuchâtel seront fortement dépendants de l'intensité du focusing. Davis et al. (1984) arrivent à des conclusions similaires dans leur étude sur des petits lacs américains.

La comparaison entre les différentes stations analysées montre une relative uniformité de composition. Ceci n'explique donc pas la disparité rencontrée au niveau du sédiment. Toutefois, le fait que les pollens à ballonets soient susceptibles d'être remis plus facilement en suspension pourrait entraîner des disparités spatiales dans leur distribution. Les zones le plus soumises à la resuspension devant être logiquement appauvries en pollens à ballonets et les zones d'accumulation comparativement enrichies. Dans cette optique le fait que la carotte C19c, riche en pollens à ballonets, ait été prélevée dans un site comparativement peu profond (55m) par rapport à la carotte LN01 (130m) est quelque peu contradictoire. Il n'en reste pas moins que cette hypothèse mériterait d'être testée de manière plus approfondie par un complément d'étude au niveau du sédiment de surface. Une telle étude pourrait permettre notamment de vérifier si la profondeur joue un rôle au niveau de la représentation des pollens à ballonets et si de fortes disparités de composition pollinique du sédiment peuvent exister à petite échelle.

La saisonnalité est reconnaissable dans le matériel récolté par les pièges à sédiments. Toutefois, le fait que la resuspension soit importante en hiver est un facteur parmi d'autres qui rendra cette reconnaissance probablement impossible au niveau du sédiment.

4.4.11. Etude des isotopes stables du carbone et de l'oxygène des carbonates récoltés par pièges à sédiments

Les analyses des isotopes stables du carbone et de l'oxygène ont été entreprises par Maria Letizia Filippi, de l'Institut de Minéralogie et de Pétrographie de l'Université de Lausanne. Ces analyses qui ont porté sur le matériel des pièges à sédiments de l'année 1993 ont fait l'objet d'une publication (Filippi et al., 1998). J'aimerais ici discuter brièvement les principaux résultats ainsi que les conclusions de cette étude:

- la séparation du sédiment en différentes fractions granulométriques analysées séparément a permis de montrer que la calcite endogénique est concentrée dans les fractions 2-6 μ m et 6-20 μ m (cf. Filippi et al., 1998; Figs. 10 et 11). Ceci rejoint nos conclusions précédentes (cf. 4.4.3. et 4.4.4.) et est particulièrement bien montré à la Figure 11; la différence entre température épilimnique mesurée et température de l'eau lors de la cristallisation recalculée d'après les équations de O'Neil et al. (1969), modifiées par Friedman and O'Neil (1977) est en effet voisine de zéro pour les fractions 2-6 μ m et 6-20 μ m d'un échantillon de juillet 1993. Le signal isotopique des autres fractions correspond plus à celui d'un mélange entre calcite endogénique et carbonates allochtones.

- l'influence des carbonates allochtones montre une légère diminution avec l'éloignement de la source; la différence entre les valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ de la station de Cortaillod, proche de l'embouchure de l'Areuse (environ 1km), et celle de Chevroux, éloignée d'environ 5km, a atteint en moyenne 0.29‰ durant l'été 1993 (Filippi et al., 1998; Table 1). Cette différence est donc relativement faible en comparaison des variations saisonnières des valeurs du $\delta^{18}\text{O}$ de la station de Cortaillod dont l'amplitude totale atteint 2‰, ce qui traduit la variabilité saisonnière de la composition du matériel récolté, le pourcentage de calcite allochtone atteignant 20-50% en hiver et 5-20% en été (Filippi et al., 1998; Fig.3).

- la comparaison entre température épilimnique mesurée et température recalculée d'après les valeurs $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates récoltés d'après les équations de O'Neil et al. (1969), modifiées par Friedman & O'Neil (1977) a permis de conclure qu'une précipitation en déséquilibre peut avoir lieu (Mai 1993, $\Delta T=6^\circ\text{C}$, Fig.6), et ceci probablement en relation avec une précipitation rapide activée par une activité biologique élevée. La concentration en chlorophylle a en effet atteint durant cette période (20.4.-115.95) les valeurs les plus élevées de toute la période allant de juin 1992 à mars 1995. On pourrait rétorquer que la calcite récoltée le 11 mai a pu précipiter dans une eau de température plus élevée que la moyenne de la température épilimnique sur la période considérée. Toutefois, même lors de la campagne du 10.5., sur les 17 stations de mesure qui ont couvert l'ensemble du lac, la température enregistrée ne compense pas l'écart de 6°C observé entre température calculée et moyenne des températures mesurées, même en considérant la température de surface. D'autre part, les tailles légèrement plus élevées des particules lors de cette période (Figs.4.12. et 4.13.) tend à confirmer l'hypothèse que ces calcites ont précipité plus rapidement que celles récoltées plus tard dans la saison. Il n'est par ailleurs pas impossible qu'une précipitation en léger déséquilibre ait lieu plus tard dans la saison. Les calculs de ΔT de M.-L. Filippi (Filippi et al., 1998; Fig.6) ne tiennent en effet pas compte de la part allochtone de la calcite. Or, si on

estime cette part à 10% durant l'été (Fig.4.16.). les ΔT sont tous déplacés d'environ un degré Celsius (0.25‰) et toutes les valeurs estivales indiquent alors un déséquilibre compris entre 0 et 1‰ (0-4°C). Il est intéressant de noter que l'amplitude de ce déséquilibre correspond approximativement à la variation des valeurs isotopiques de l'oxygène dans le sédiment lors de l'eutrophisation récente (Fig.5.30.). Une précipitation en déséquilibre de la calcite depuis la récente eutrophisation de la plupart des lacs suisses expliquerait les variations observées vers des valeurs jusqu'à 4‰ plus négatives dans certains lacs. Une telle hypothèse a déjà été avancée, notamment pour le Greifensee (Gat & Lister 1995) ainsi que pour le lac Arreso, au Danemark (Fronval et al. 1995). En ce qui concerne le processus en cause, le déséquilibre isotopique est connu pour les carbonates d'origine biologique (coraux par exemple), mais à notre connaissance les processus n'ont pas encore été étudiés pour les carbonates d'origine biochimique.

- une autre conclusion importante a été tirée au niveau de l'origine des carbonates récoltés dans les pièges durant l'hiver; les valeurs isotopiques de ces carbonates indiquent en effet qu'ils sont principalement constitués de calcite dont l'origine est endogénique estivale, et qui est donc remise en suspension.

4.5. Conclusions

Les estimations de la vitesse moyenne de sédimentation des particules suggèrent que le temps de résidence dans la colonne d'eau des particules qui forment la partie quantitativement importante du réservoir de matériel particulaire est de l'ordre de quelques dizaines de jours. Les résultats des évaluations théoriques (loi de Stokes) sont en accord avec les résultats des évaluations expérimentales.

Les indices de saturation de la calcite indiquent que les eaux du lac de Neuchâtel sont donc en situation de sursaturation quasi permanente. Les fortes sursaturations épilimniques saisonnières présentent un développement similaire d'une année à l'autre, leurs maximas s'étendant de mai à août ($IAP/K_c > 8$).

Les analyses minéralogiques et géochimiques du matériel récolté dans les pièges, les mesures de conductivité ainsi que les analyses d'alcalinité et de calcium dissous ont permis d'appréhender l'étendue de la période de précipitation de la calcite. Durant les années 1993 et 1994 la précipitation a débuté fin avril à début mai et s'est prolongée jusqu'en septembre ou en octobre.

Il apparaît qu'une sursaturation élevée est une condition nécessaire mais pas nécessairement suffisante pour qu'il y ait effectivement précipitation. La précipitation est activée lors des périodes de forte productivité planctonique, elle est plus faible lors des phases d'eaux claires. Ce fait est probablement dû à l'influence conjointe d'une nucléation hétérogène facilitée et d'une augmentation passagère de la sursaturation par consommation du CO_2 . L'influence de l'augmentation estivale de la température épilimnique n'est pas négligeable, la production phytoplanctonique estivale ayant été faible en 93 et 94 alors que la précipitation est restée élevée.

Le schéma des flux sédimentaires montre une claire dépendance saisonnière. Ces flux sont maximaux pendant la période automne-hiver où ils totalisent environ les 2/3 du matériel récolté contre 1/3 environ pour la période printemps-été.

Ce schéma saisonnier est dû à l'influence prépondérante de resuspensions du sédiment durant l'automne et l'hiver, influence qui est décelable par divers caractères, au niveau de la composition minéralogique du matériel et de sa géochimie, et plus précisément:

- la composition du matériel se rapproche de celle du sédiment de surface de la station considérée avec l'augmentation du flux sédimentaire, que ce soit au niveau du pourcentage de carbonates ou du contenu en carbone organique;
- la situation d'opposition temporelle entre les périodes de production phytoplanctonique et les flux sédimentaires du carbone organique indique que la majeure partie du carbone organique récolté en hiver provient de resuspensions;
- les valeurs isotopiques de l'oxygène des carbonates récoltés en automne et en hiver montrent que ceux-ci sont principalement constitués de calcite endogénique précipitée en été. La vitesse moyenne de chute des particules (paragraphe 4.4.5) rend par ailleurs improbable l'hypothèse d'une sédimentation lente de la calcite endogénique estivale.

Les flux sédimentaires sont généralement plus élevés sur les tombants que dans la zone profonde, la différence étant maximale en automne, moyenne en été ainsi qu'en début d'hiver, faible en fin d'hiver et au printemps. Diverses indications montrent que cette différence est due à une resuspension plus importante sur les tombants; la production phytoplanctonique n'est pas sensiblement différente dans les deux zones, mais les charges en suspension sont plus élevées sur les tombants lorsque les flux y sont plus importants, en automne et en hiver. Des indications d'une précipitation de calcite plus élevée dans la zone des tombants manquent également dans la mesure où les charges n'y sont pas supérieures à celles rencontrées dans la zone profonde durant la période estivale.

Plusieurs indications nous amènent à conclure qu'une partie importante voire prépondérante de la resuspension est d'origine locale plutôt qu'originale d'un transfert latéral depuis le plateau lacustre; (i) en faisant le bilan des carbonates déposés sur le plateau durant l'été et en postulant qu'ils sont en totalité déposés dans la zone profonde durant la période automne-hiver, les flux obtenus par ce calcul ne balancent pas les flux de la période hivernale dans la zone profonde; (ii) la qualité du matériel récolté se rapproche de celle du sédiment de la station considérée

Chapitre 4: Sédimentation actuelle

avec l'augmentation du flux total; (iii) la turbidité est durant la période non stratifiée parfois plus élevée à proximité du fond du lac que sur le plateau ou les tombants, ce qui rend improbable l'hypothèse d'un transfert latéral lors des événements incriminés.

La quantification de la resuspension a permis d'estimer son importance dans le cycle du phosphore. Les résultats laissent apparaître que le flux resuspendif de phosphore correspond environ aux 2/3 des apports de phosphore au lac. Même en considérant que seule une partie de ce phosphore est facilement bioassimilable, la resuspension est susceptible d'avoir un effet non négligeable sur son recyclage ainsi que sur le développement phytoplanctonique printanier.

Les pourcentages de resuspension estimés à Chez-le-Bart, Cortaillod et Chevroux évoluent de respectivement 23%, 24% et 48% au printemps et en été à respectivement 71%, 82% et 92% en automne et en hiver.

Il apparaît que l'état de la stratification thermique détermine la localisation et l'intensité de la resuspension, la zone qui y est soumise s'agrandissant avec l'affaiblissement de la stratification. En été, cette zone est limitée à la zone peu profonde, puis elle s'étend en début d'automne aux tombants où soit un effet de "canalisation" des courants à l'interface épilimnion-hypolimnion, soit des courants plus importants dus à l'action des ondes internes peuvent être invoqués pour expliquer la valeur extrêmement élevée du flux resuspendif à l'interface eau-sédiment (Jo) par rapport à l'intensité des vents. En fin d'automne, la zone soumise à la resuspension s'étend à la plaine profonde où celle-ci se poursuit durant l'hiver. L'établissement de la stratification printanière provoque rapidement une diminution de son importance dans la zone profonde.

Les coefficients de diffusion turbulente verticale déduits d'après les profils des flux sédimentaires varient également fortement en fonction de l'évolution de la stratification thermique, ils passent à la station de Chez-le-Bart de 2.2[cm²/s] en été à 10.5[cm²/s] en automne et à 70.9[cm²/s] en hiver, puis rediminuent au printemps (14.1[cm²/s]). Ces résultats indiquent que les particules sont de plus en plus susceptibles d'être distribuées verticalement à travers la colonne d'eau à mesure que le contraste thermique diminue. Lorsque le lac est homogène thermiquement, les particules sont distribuées dans la totalité de la colonne d'eau. Lorsque un contraste thermique subsiste, les particules sont avant tout resuspendues dans la zone épilimnique et transportées au sein de celle-ci.

Il s'avère pour le lac de Neuchâtel et également pour probablement d'autres lacs de dimensions similaires que l'action des vagues sur le littoral et le plateau lacustre ne contribue pas de manière prépondérante à la redistribution du sédiment. L'influence du mélange complet hivernal apparaît être le facteur dominant. Dans le lac de Neuchâtel, le focusing semble donc principalement initié par les courants de fond qui redistribuent le sédiment, la redépôtition du sédiment devant être gouvernée par le schéma général de la circulation.

La comparaison des résultats des stations de Chevroux et de Cortaillod a permis de postuler l'existence d'un probable régime préférentiel de circulation qui se manifeste par un courant de downwelling le long du talus SE et d'upwelling le long du talus NW. Ce régime préférentiel serait dû à la prépondérance du vent d'ouest et entraînerait une distribution différente des particules dans ces deux zones, favorisant leur transport vers la surface dans le bassin NW et diminuant ce transport dans le bassin SE.

Les analyses des isotopes stables du carbone et de l'oxygène, entreprises par Maria Letizia Filippi, ont permis:

- de montrer que la calcite endogénique est concentrée dans les fractions 2-6µm et 6-20µm, le signal isotopique des autres fractions correspondant à un mélange entre calcite endogène et carbonates allochtones.
- de conclure qu'une précipitation en déséquilibre peut avoir lieu, et ceci probablement en relation avec une précipitation rapide activée par une activité biologique élevée. Une précipitation en déséquilibre de la calcite depuis la récente eutrophisation mériterait d'être vérifiée dans d'autres lacs suisses, où les variations observées atteignent dans certains lacs jusqu'à 4‰.
- de confirmer que les carbonates récoltés dans les pièges durant l'hiver sont principalement constitués de calcite dont l'origine est endogénique estivale, et qui est donc remise en suspension.

Les analyses polliniques du matériel des pièges à sédiments entreprises par Pascale Ruffaldi permettent:

- de conclure que l'état de la végétation au niveau régional est enregistré.
- de conclure que la vitesse de chute des grains de pollens est relativement rapide et qu'elle avoisine celle de la moyenne des particules.
- de conclure que la resuspension a une influence importante au niveau de la distribution des pollens, qu'elle est responsable des flux de pollens plus importants durant la période automne-hiver, ce qui suggère une dépendance des flux sédimentaires de pollens vis-à-vis de l'intensité de la resuspension.
- de suggérer que les pollens à ballonets sont remis en suspension relativement plus facilement que les autres types de pollens et que de manière générale les pollens sont remis en suspension plus facilement que les autres particules.

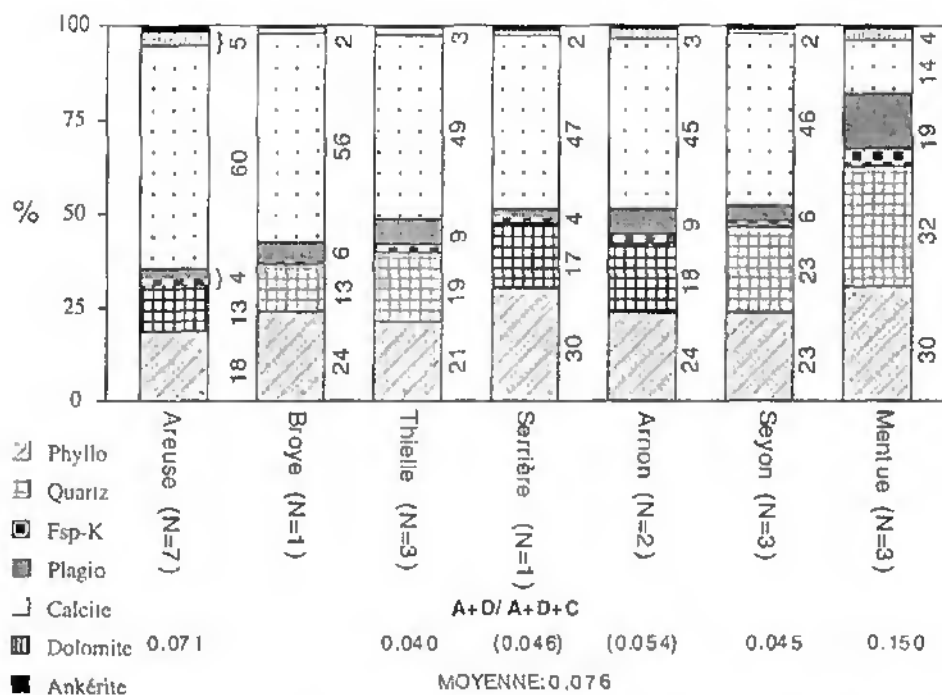


Fig.4.1. Composition minéralogique des suspensions des principaux affluents du lac de Neuchâtel; les rapports (Ankérite+Dolomite)/(Ankérite+Dolomite+Calcite) sont indiqués ainsi que leur moyenne qui ne tient pas compte des valeurs de la Serrière et de l'Arnon

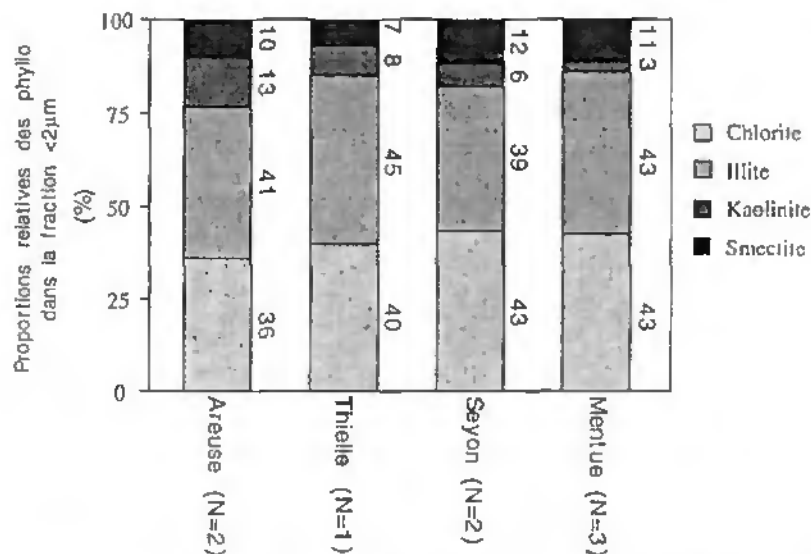
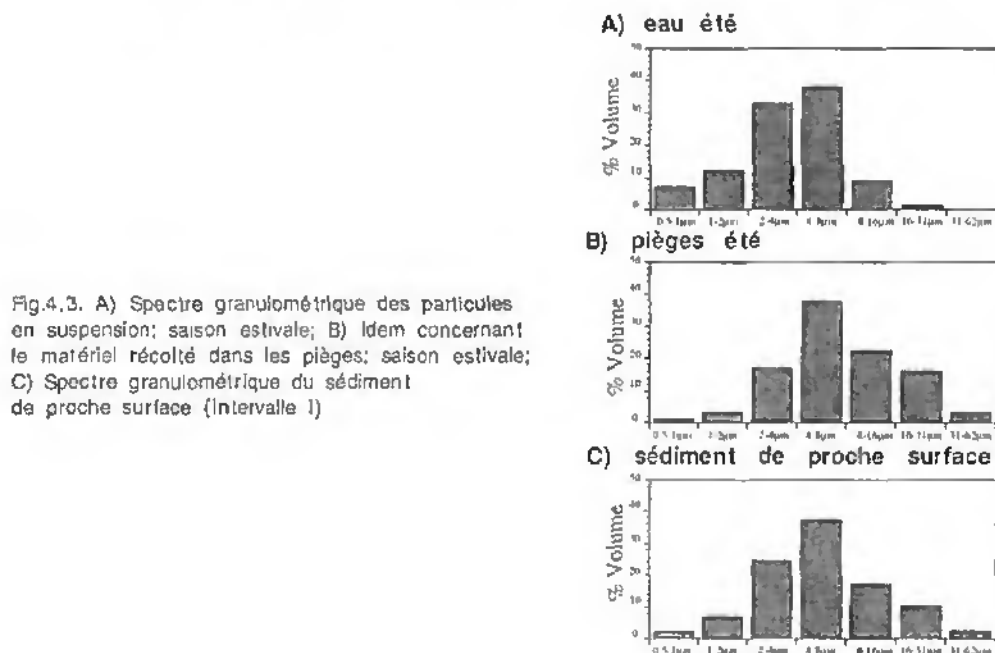


Fig.4.2. Proportions relatives des phyllosilicates dans la fraction inférieure à 2µm des suspensions des principaux affluents du lac de Neuchâtel



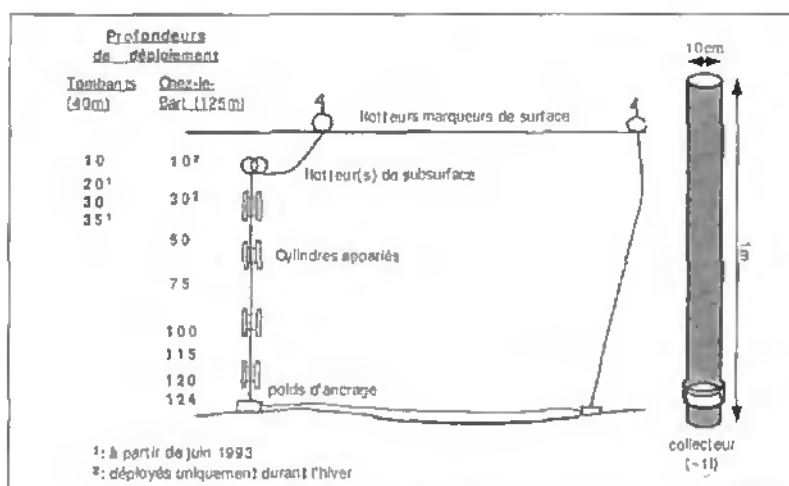


Fig.4.4. Schéma d'un piège à sédiment ainsi que d'un mouillage

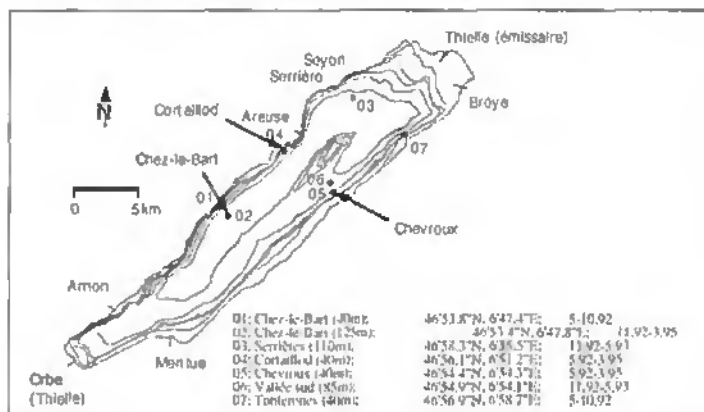


Fig.4.5. Localisation des stations de pièges à sédiments; périodes de déploiement pour chaque station

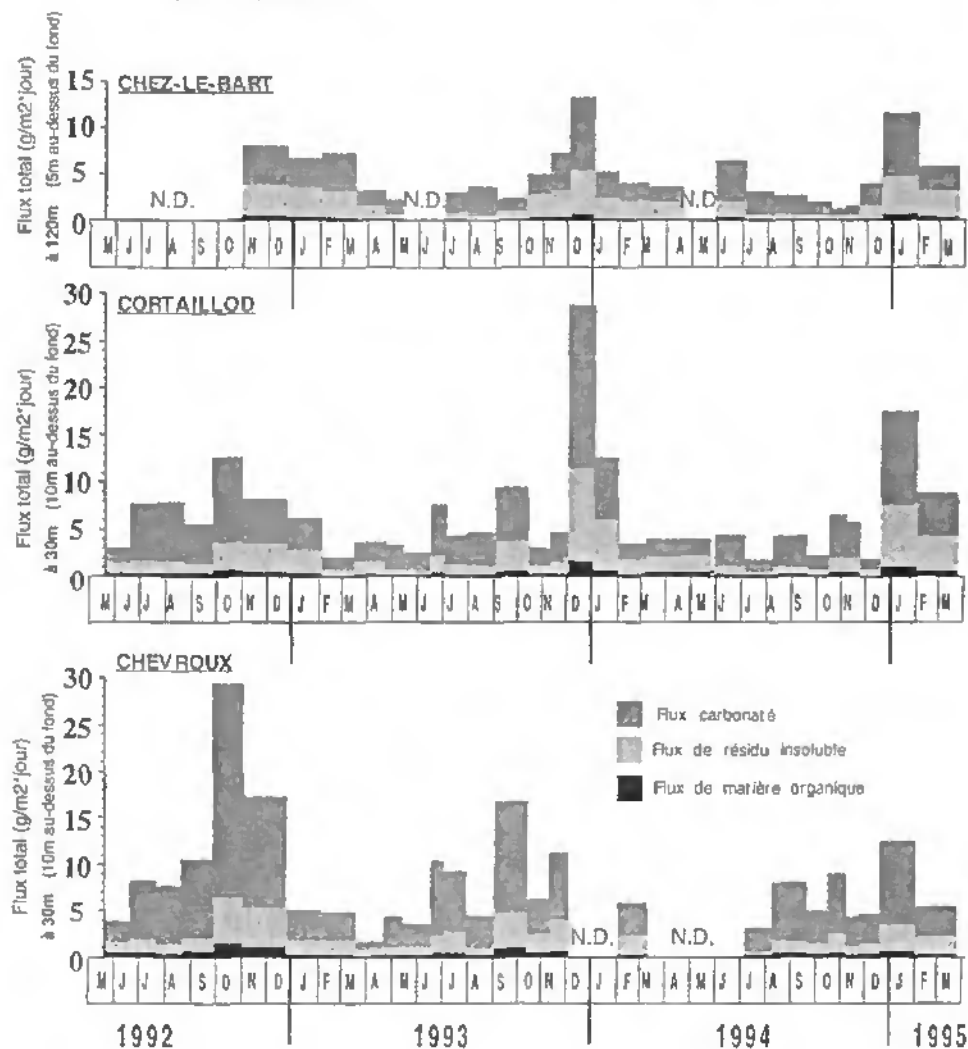


Fig.4.6. Flux sédimentaires totaux, carbonatés, détritiques et de matière organique aux stations de Chez-le-Bart, Cortaillo et Chevroix de juin 1992 à mars 1995; N.D.: non déterminé

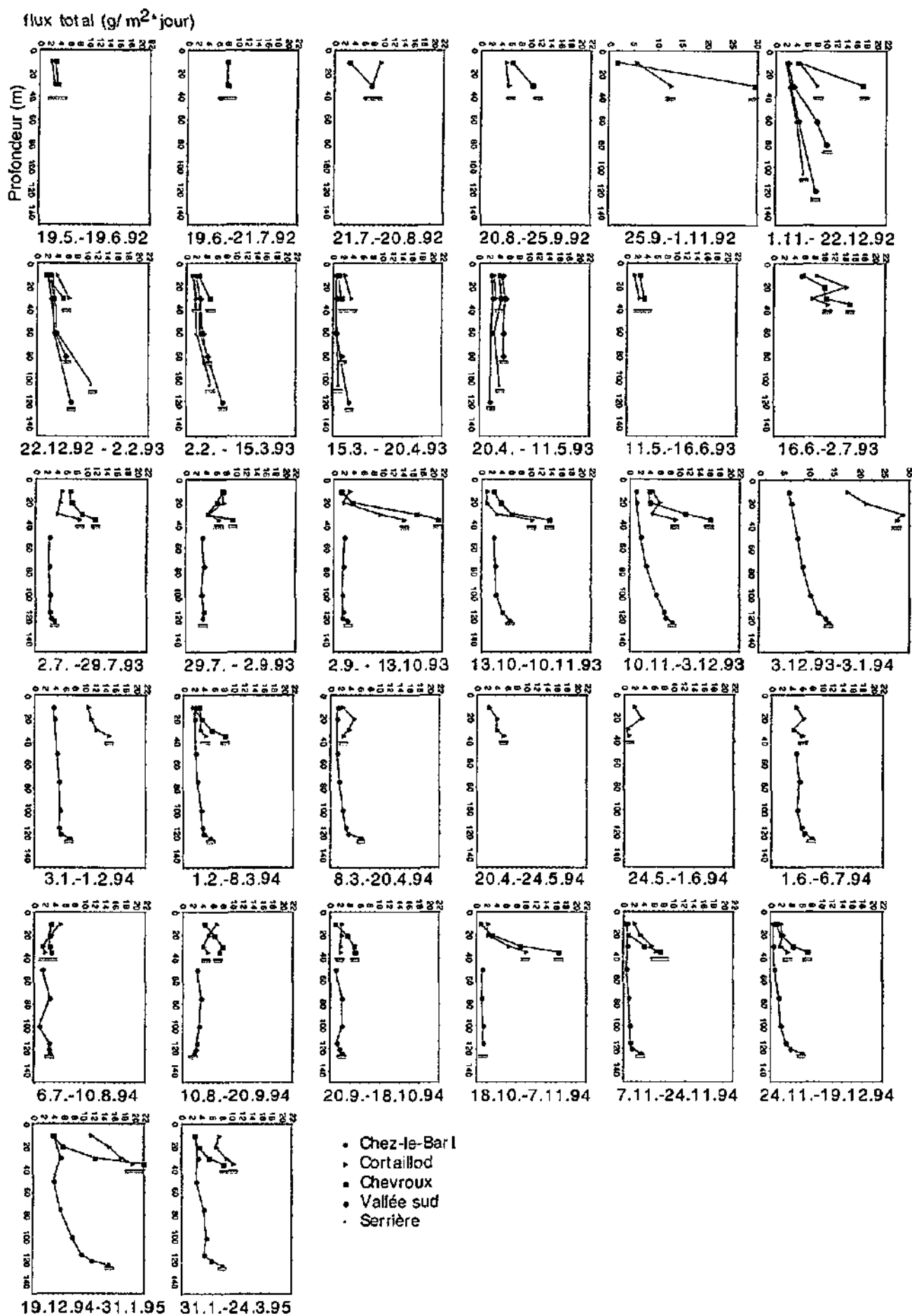


Fig.4.7. Evolution des flux totaux avec la profondeur pour chaque période d'exposition des pièges

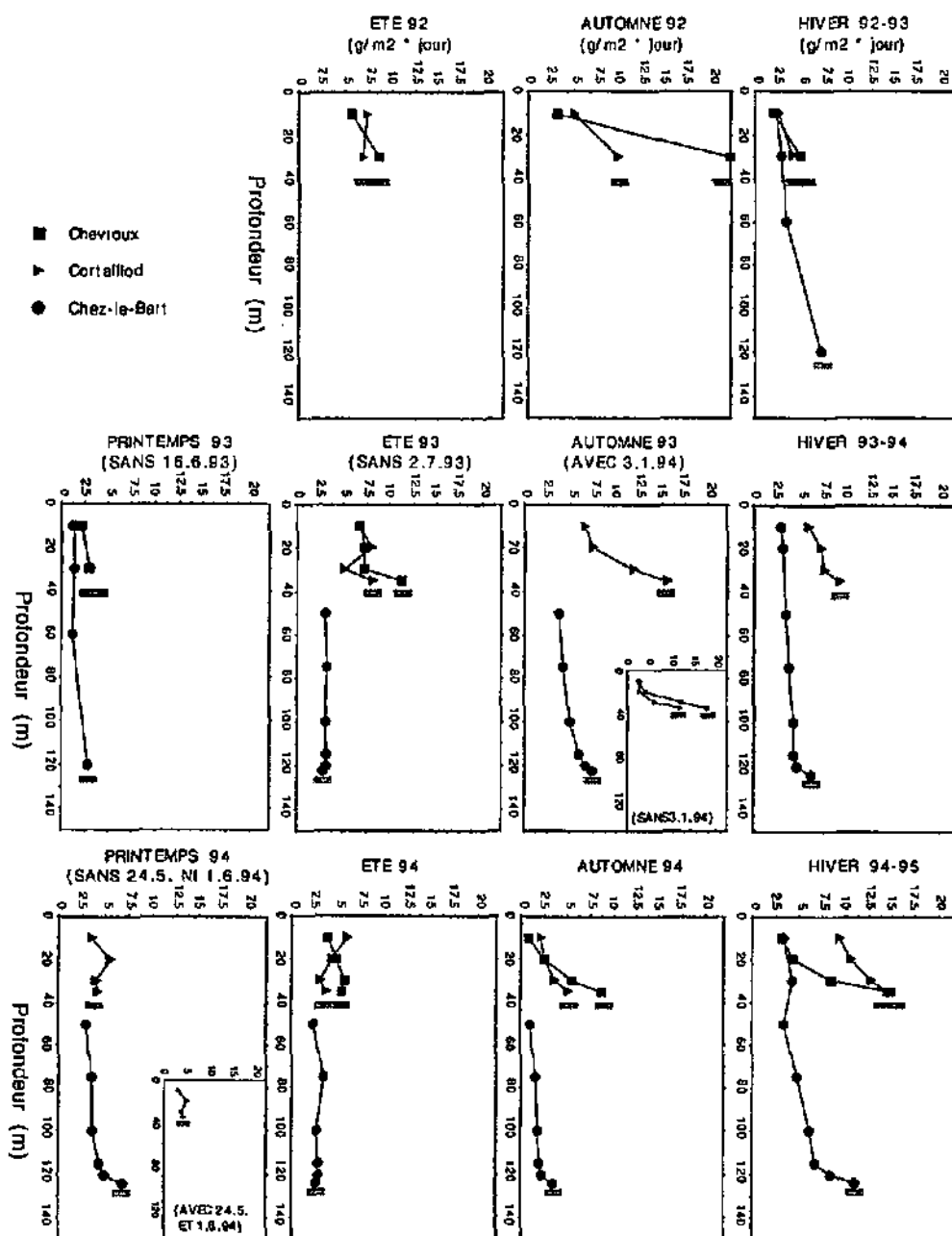


Fig.4.8. Profils verticaux des flux totaux; moyennes saisonnières

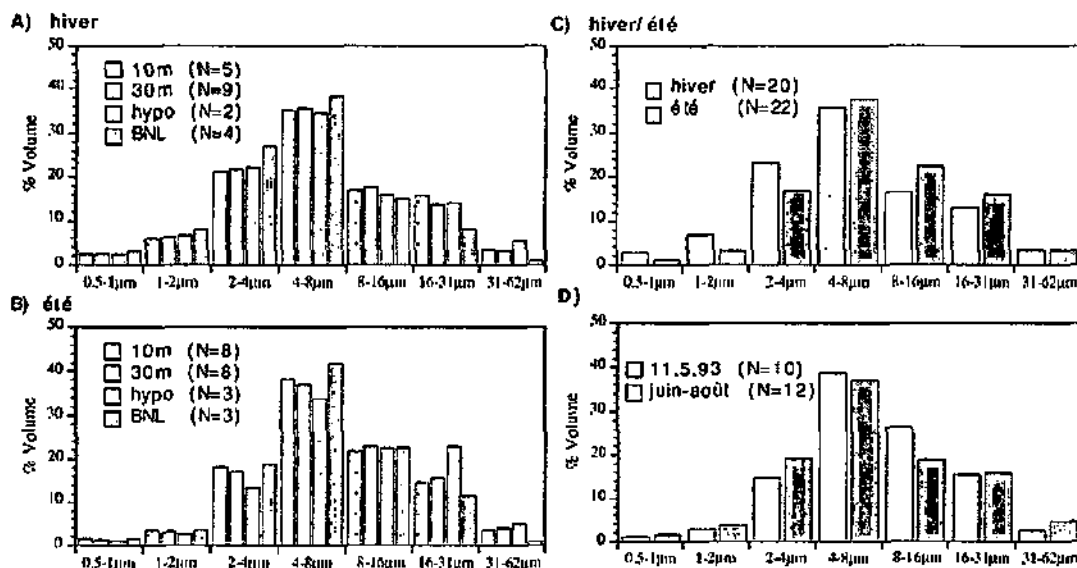
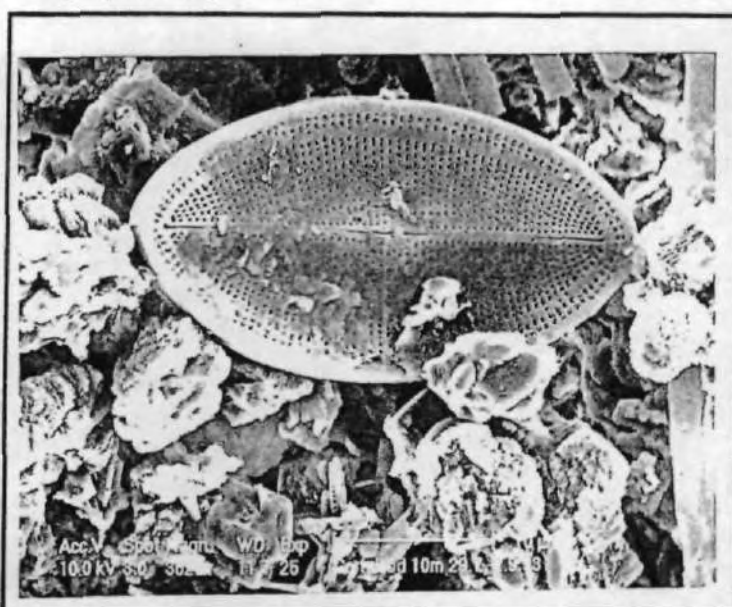


Fig.4.9. Moyennes saisonnières de la granulométrie des particules récoltées dans les plages à sédiments: A) Evolution du spectre granulométrique avec la profondeur en hiver; B) Idem en été; C) Comparaison été-hiver; D) Comparaison du spectre granulométrique du 11.5.93 avec ceux des autres périodes estivales; N: nombre de mesures

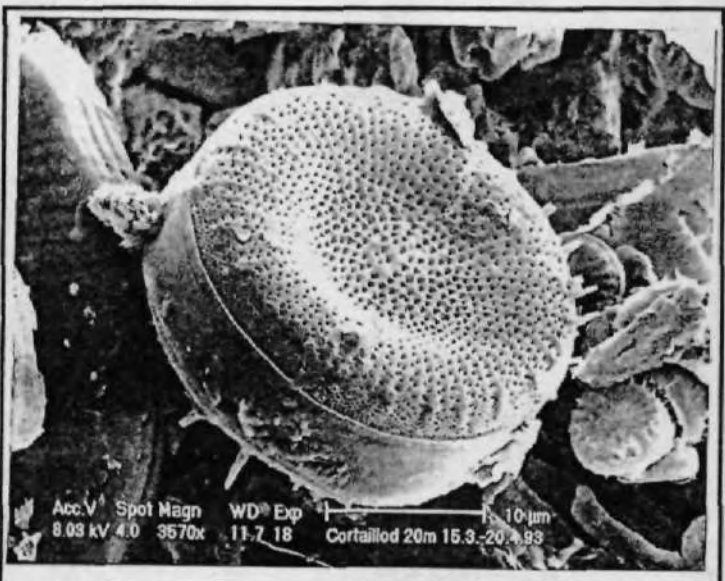
A) (2241x)



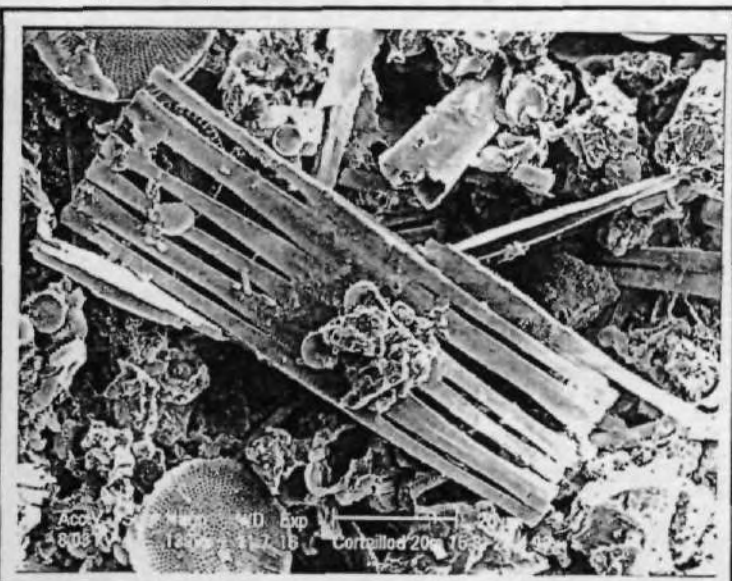
B) (3620x)



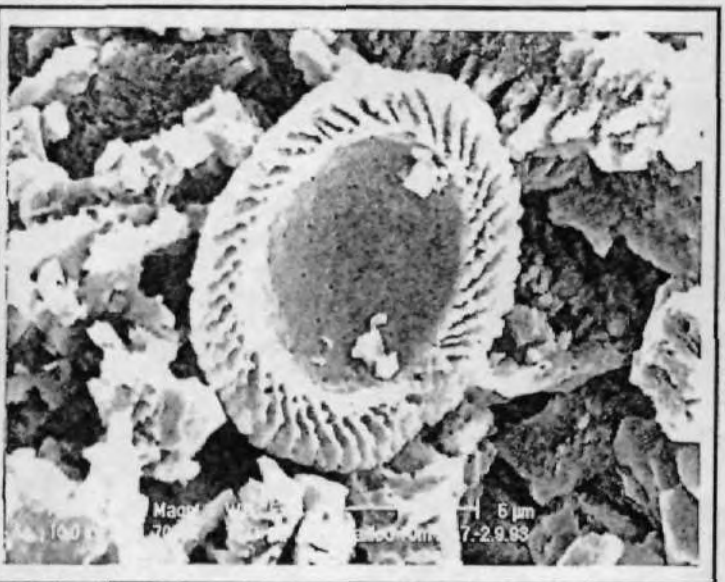
C) (3570x)



D) (1399x)



E) (7090x)



F) (1608x)

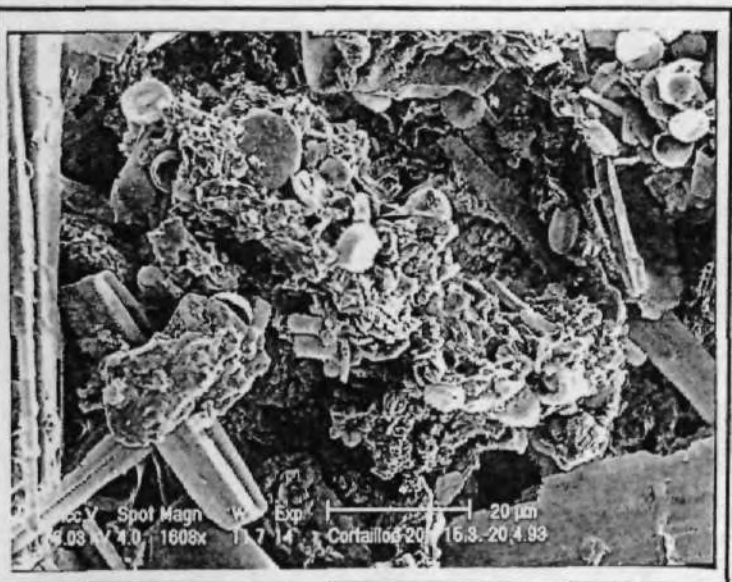
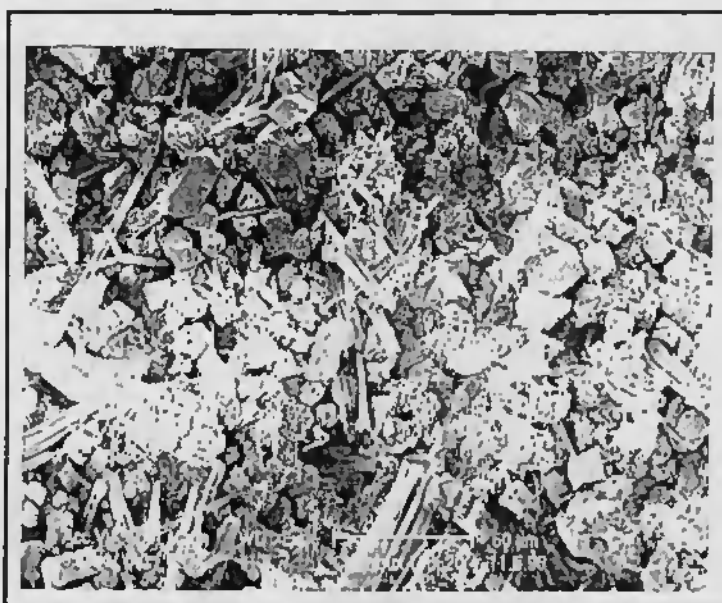
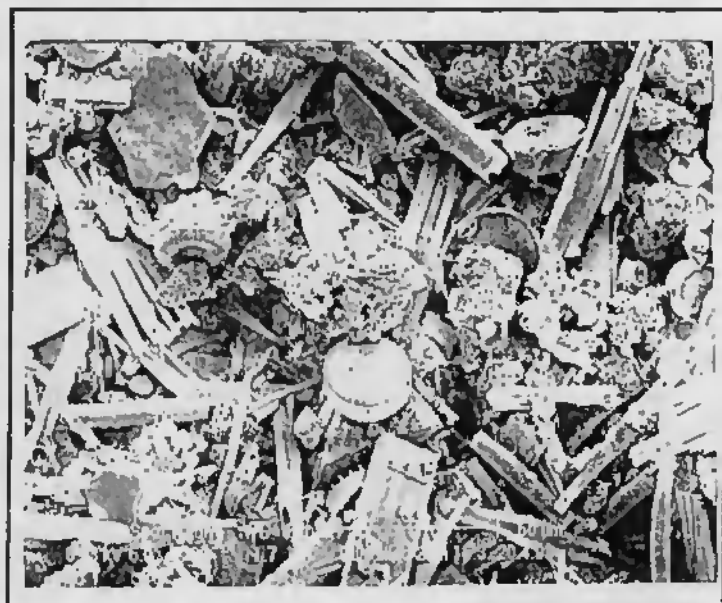
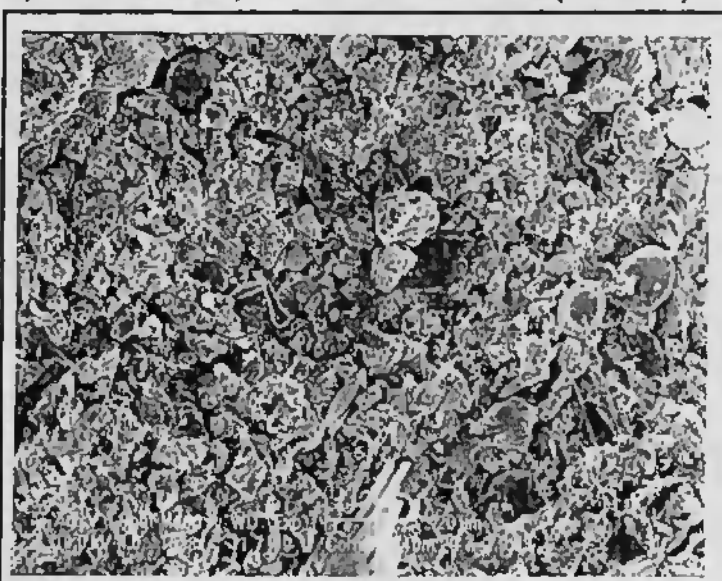


Fig. 4.10. Restes phytoplanctoniques: diatomées centriques et pennées (a,b,c et d), test de *Phacotus* sp. (e), agrégat carbonaté incluant des diatomées centriques de petite taille(f)

A) Cortaillod, 20m:15.3.-20.4.93(728x) B) Chevroux, 10m:20.4.-11.5.93(637x)



C) Cortaillod, 10m:16.6.-2.7.93(482x) D) Cortaillod, 10m:29.7.-2.9.93(1038x)



E) Cortaillod, 10m:13.10.-10.11.93(929x) F) Chez-le-Bart, 10m:3.12.-3.1.94(929x)

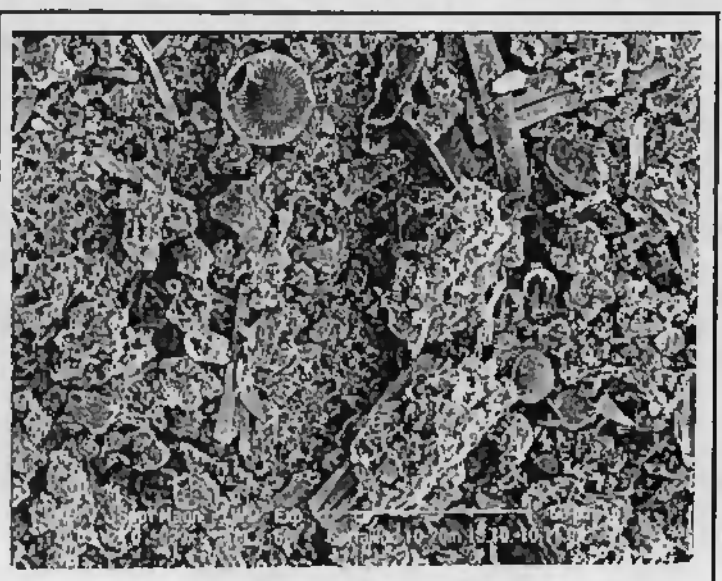
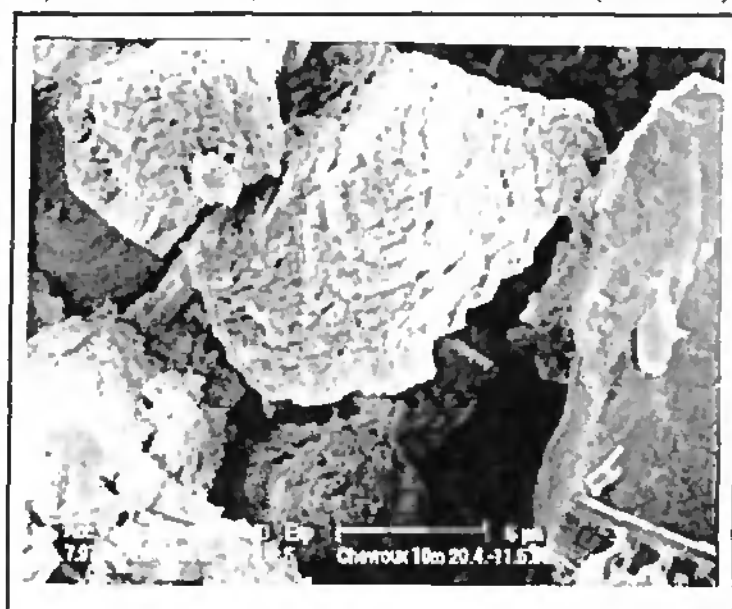
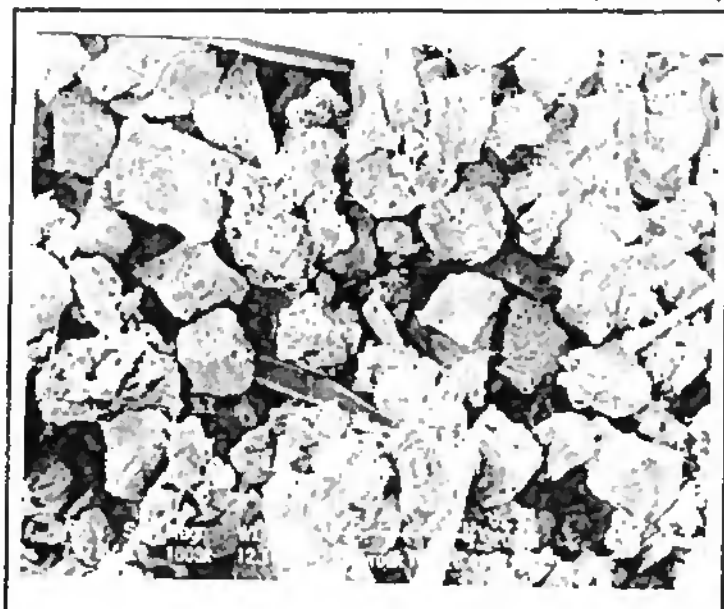
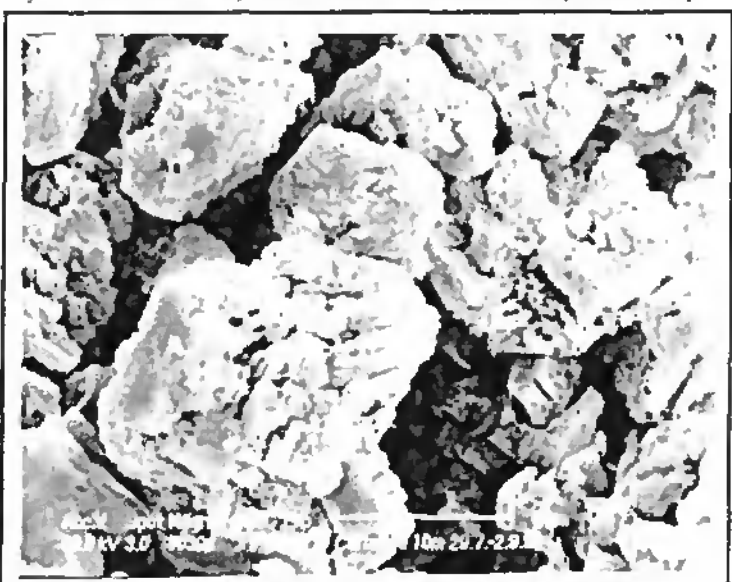
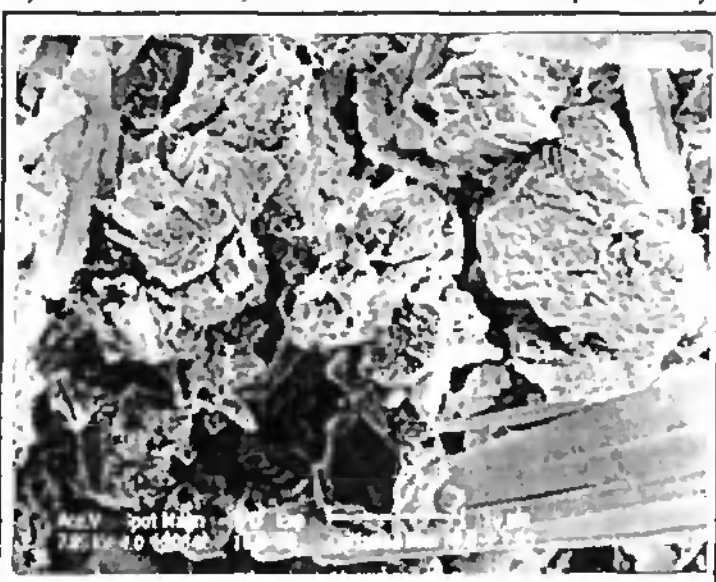


Fig.4.11. Evolution de la texture du matériel récolté au cours de l'année

A) Chevroux, 10m:20.4.-11.5.93(1603x) B) Chevroux, 10m:20.4.-11.5.93(6859x)



C) Cortaillod, 10m:16.6.-2.7.93(3084x) D) Cortaillod, 10m:29.7.-2.9.93(8030x)



E) Cortaillod, 20m:15.3.-20.4.93(2295x) F) Chez-le-Bart, 10m:3.12.-3.1.94(2990x)

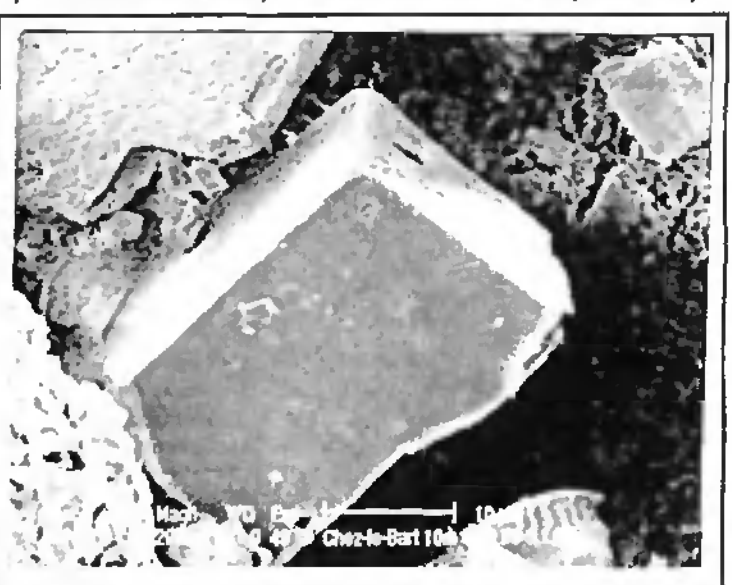
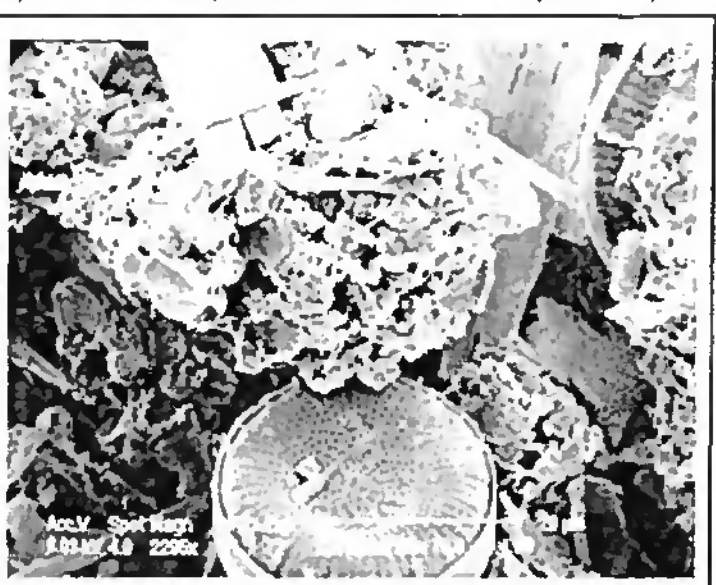


Fig.4.13 Evolution du faciès des calcites au cours de la saison estivale (A-D);
agrégat carbonaté (E); carbonate détritique (F)

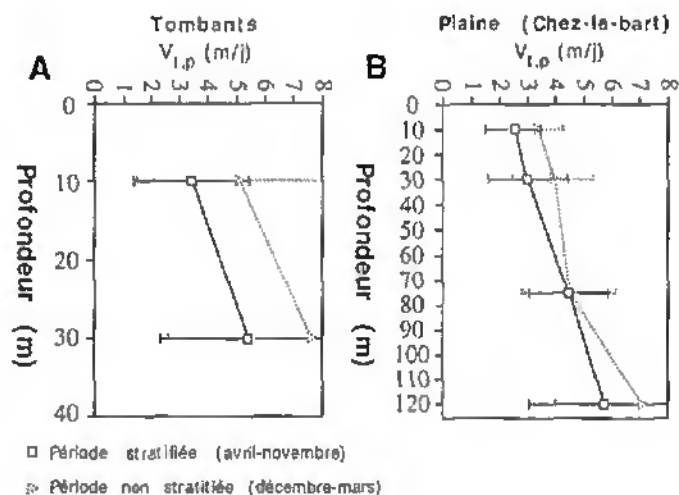


Fig. 4.13. Vitesse de chute moyennes des particules (m/j); A) Tombants, B) Plaine (Chez-le-Bart); les barres d'erreur représentent l'écart type

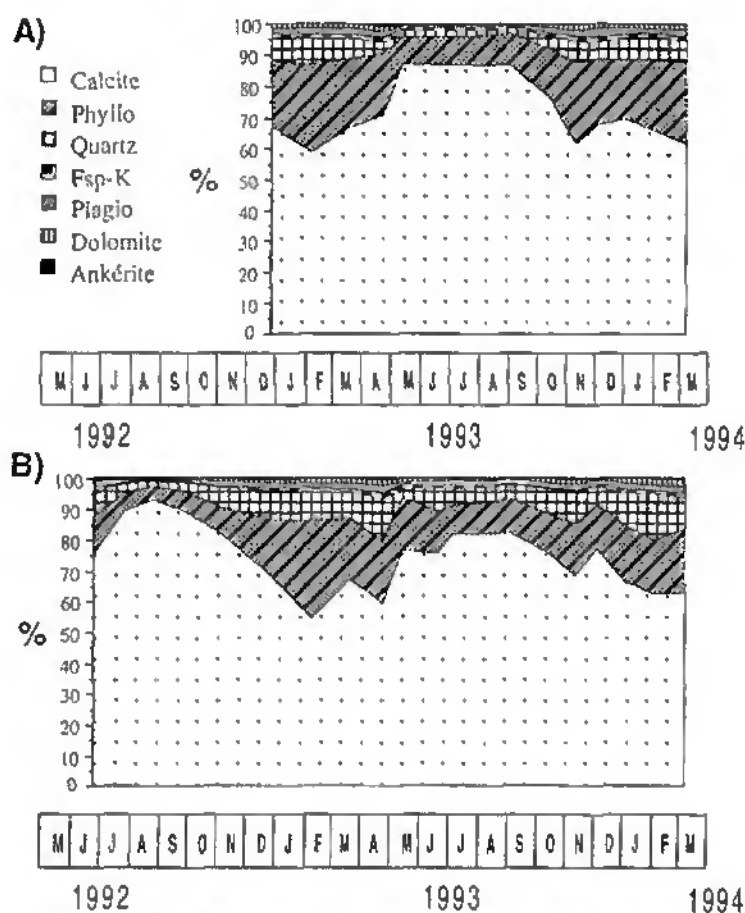


Fig. 4.14. Evolution saisonnière de la minéralogie du matériel des pièges à sédiments; A) Station de Chez-le-Bart; B) Station de Cortailled

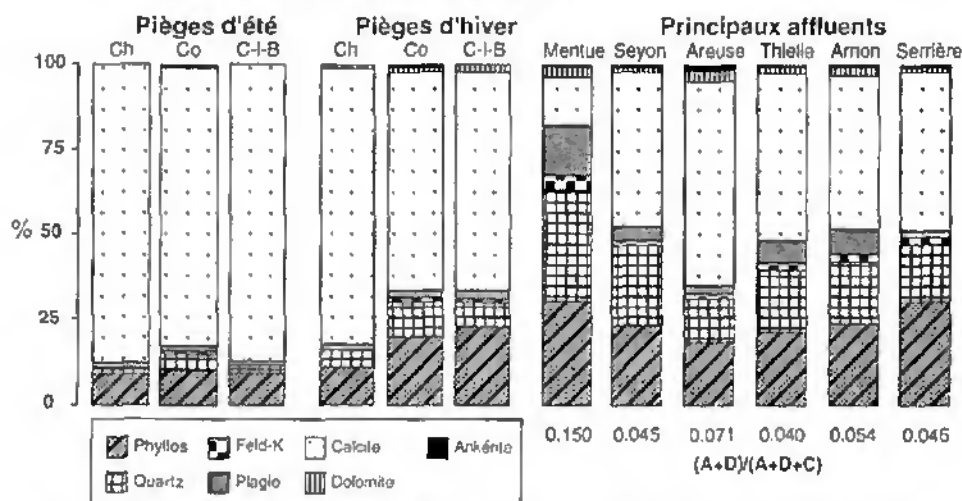


Fig. 4.15. Moyennes saisonnières de la minéralogie du matériel des pièges (Co: Cortailled; C+B: Chez-le-Bart; Ch: Chevroux); Comparaison avec les suspensions des principaux affluents du lac pour lesquels le rapport $(\text{Ankérite} + \text{Dolomite}) / (\text{Ankérite} + \text{Dolomite} + \text{Calcite})$ est ajouté

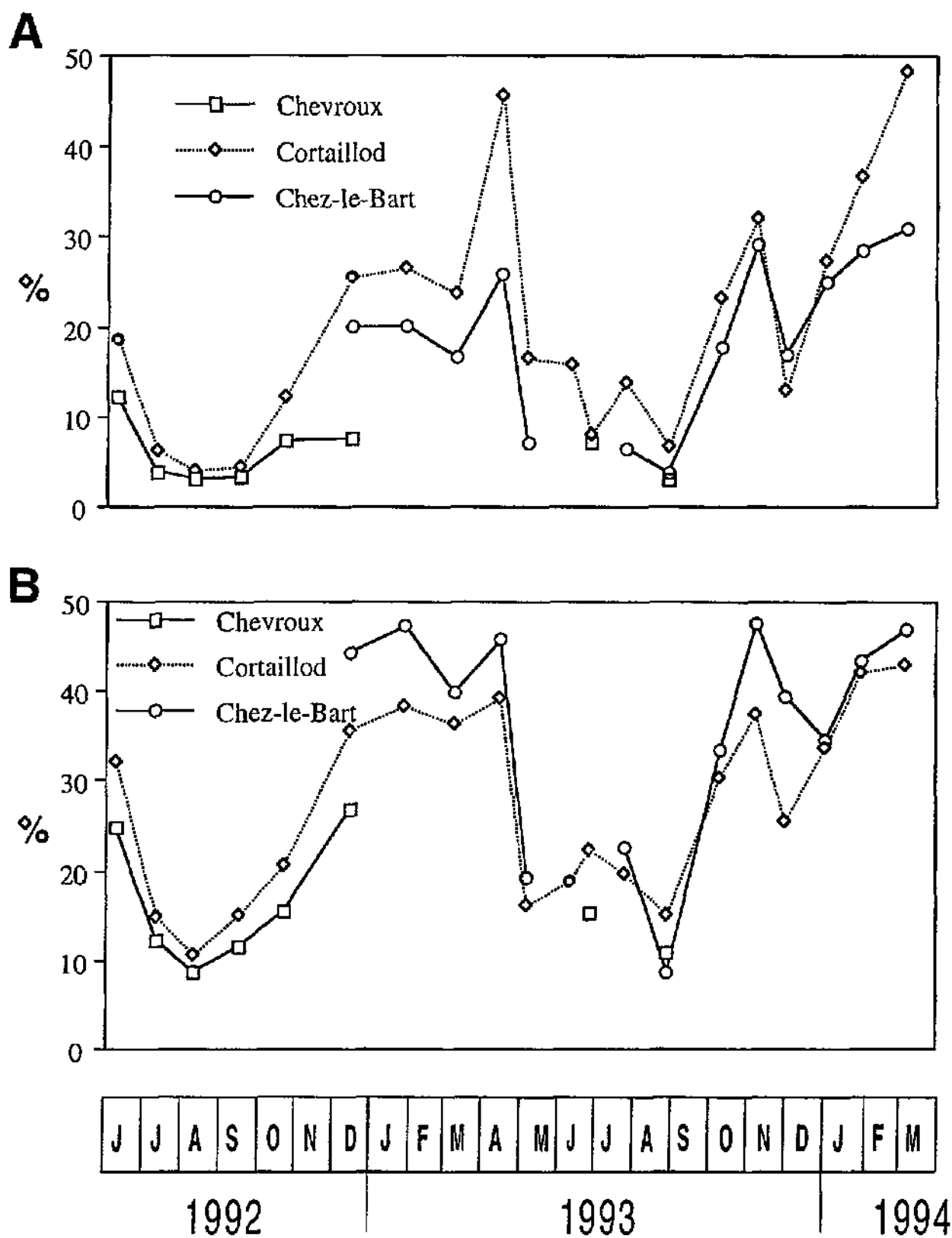


Fig.4.16. Comparaison du pourcentage estimé de calcite allochtone (A) et du pourcentage de résidu insoluble (B) dans le matériel des pièges

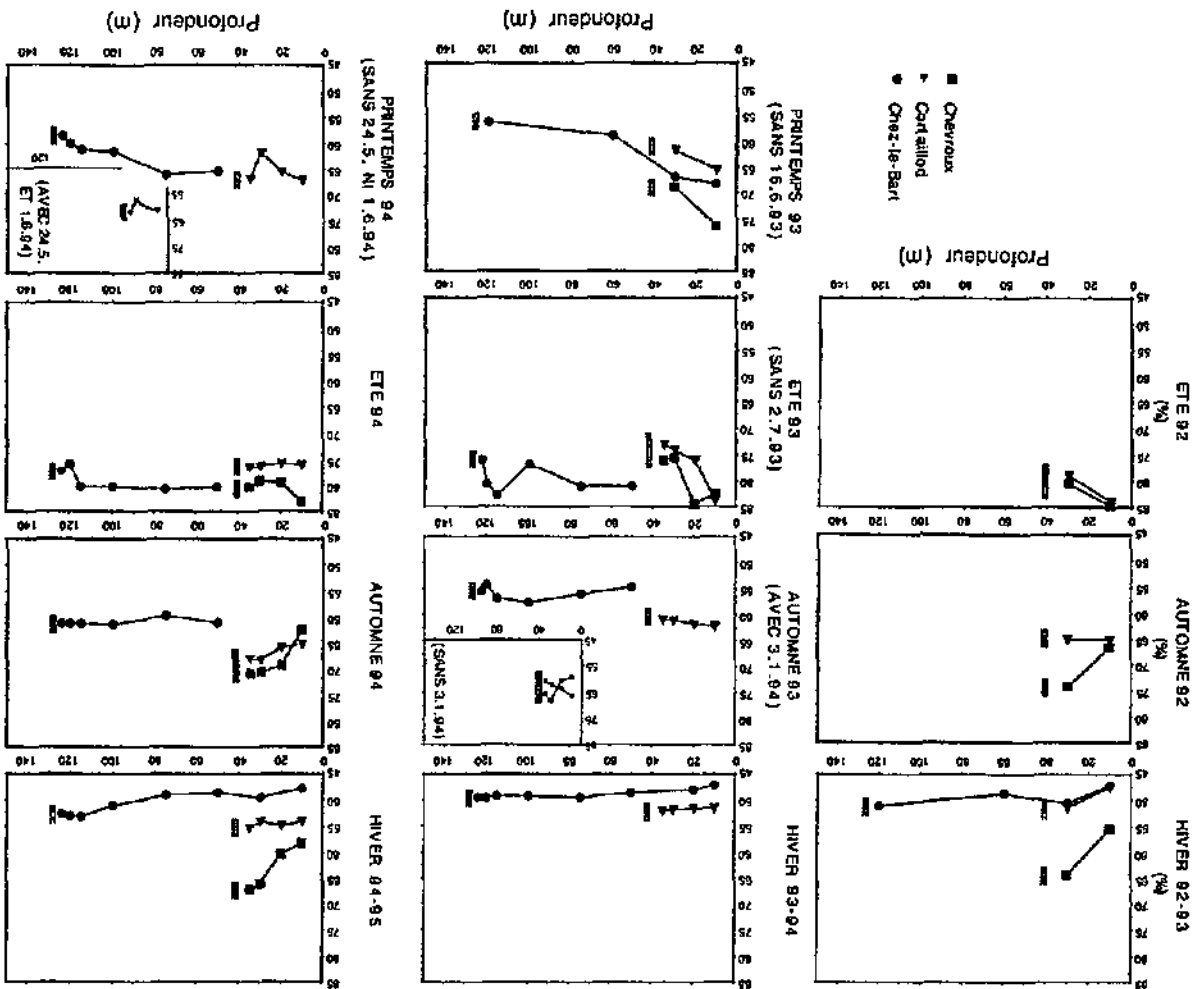


Fig.4.17. Moyennes saisonnières de l'évolution du pourcentage de carbonates avec la profondeur

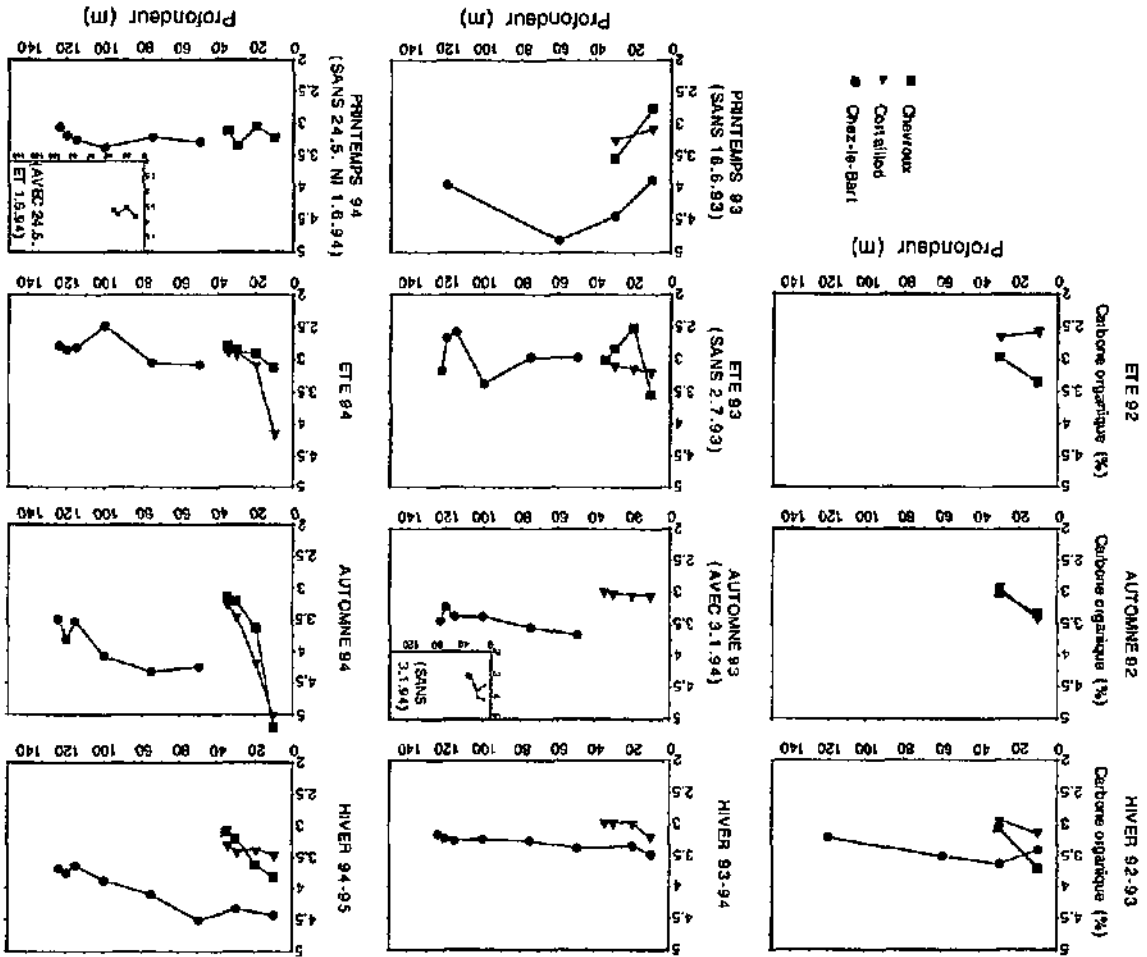


Fig.4.18. Moyennes saisonnières de l'évolution du pourcentage de carbone organique avec la profondeur

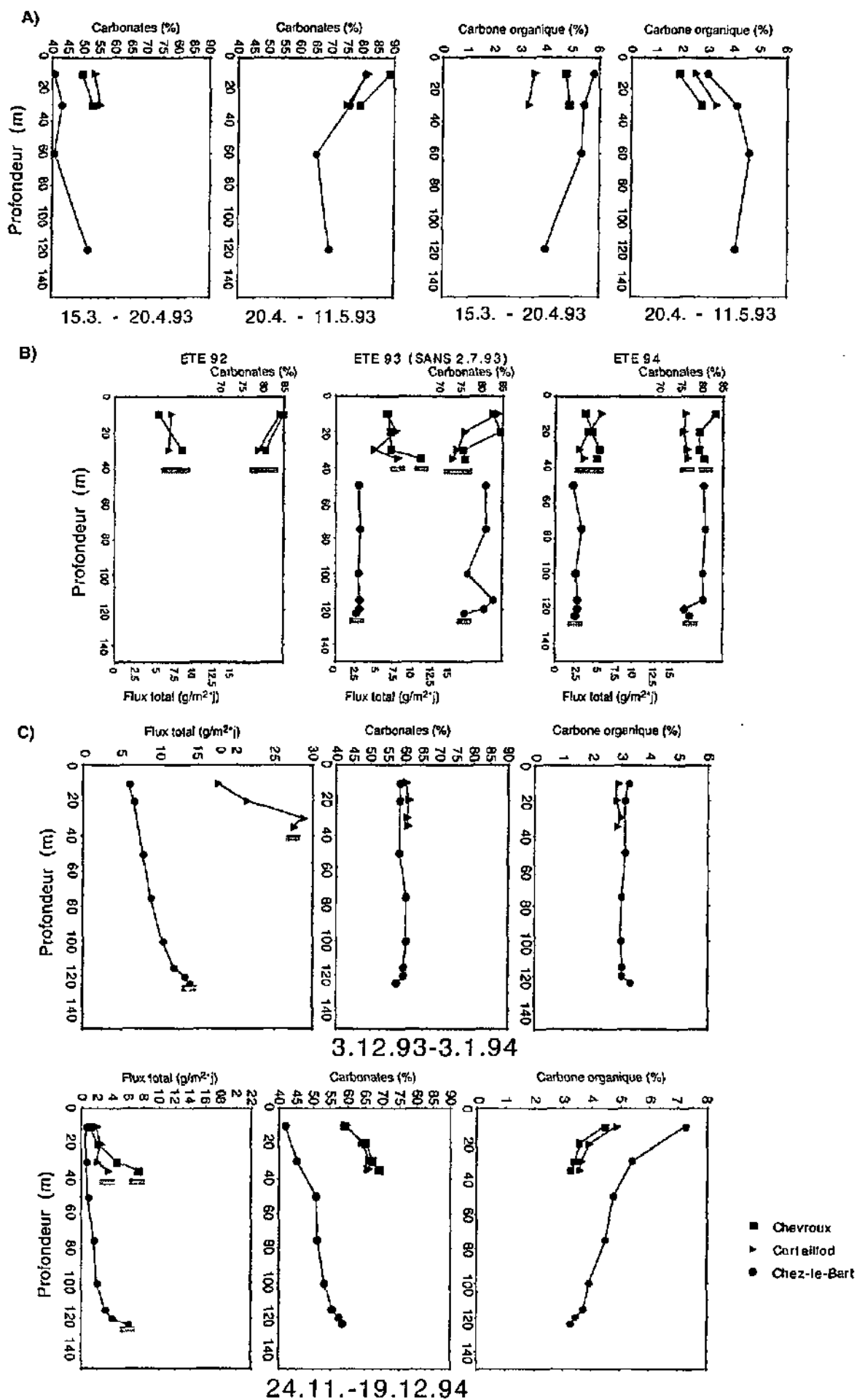


Fig.4.19. Caractéristiques saisonnières de la composition du matériel en fonction de l'évolution du flux sédimentaire;
A) Printemps; B) Été; C) Automne et hiver

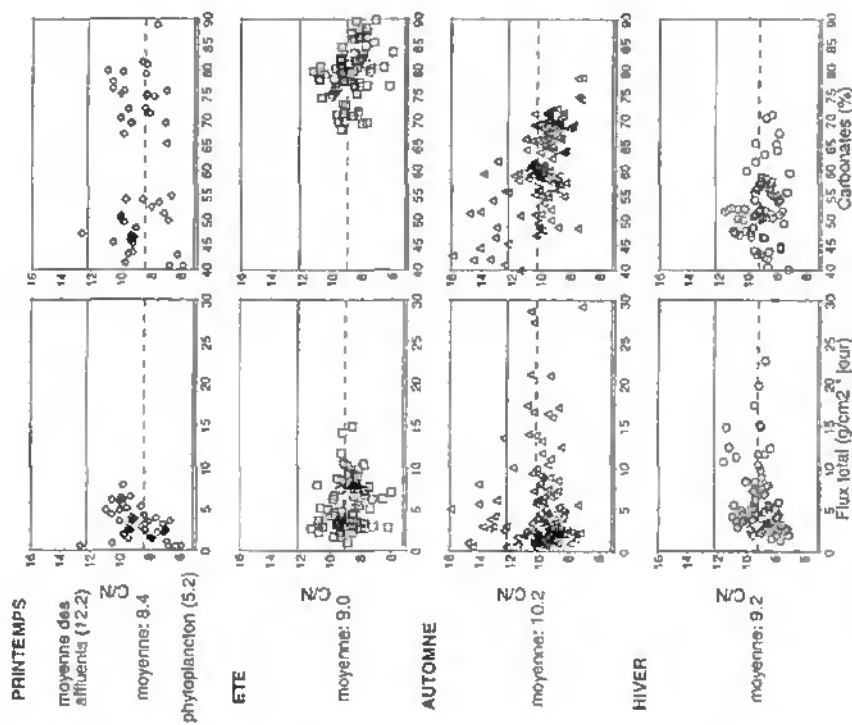


Fig 4.20. Evolution saisonnière du rapport C/N (Carbone organique / Azote total)



Fig.4.21. Indices de saturation de la calcite (IAP/Kc) de juin 92 à décembre 94

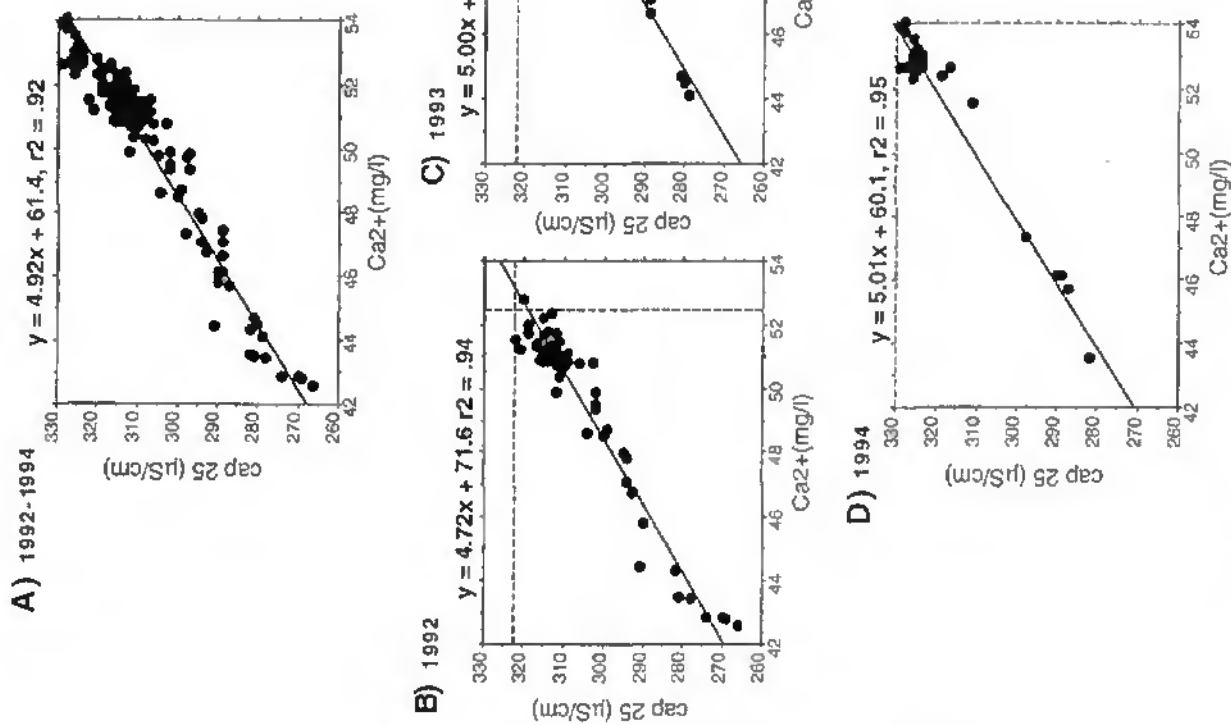


Fig.4.22. Relation entre la conductivité normalisée à 25°C (CAP25) et la concentration en calcium dissous; A) 1992-1994 (relation utilisée dans l'équation 4-5); B) 1992; C) 1993; D) 1994; Remarquez l'augmentation des valeurs maximales de conductivité et de concentration en calcium dissous entre 1992 et 1994 (lignes traitillées)

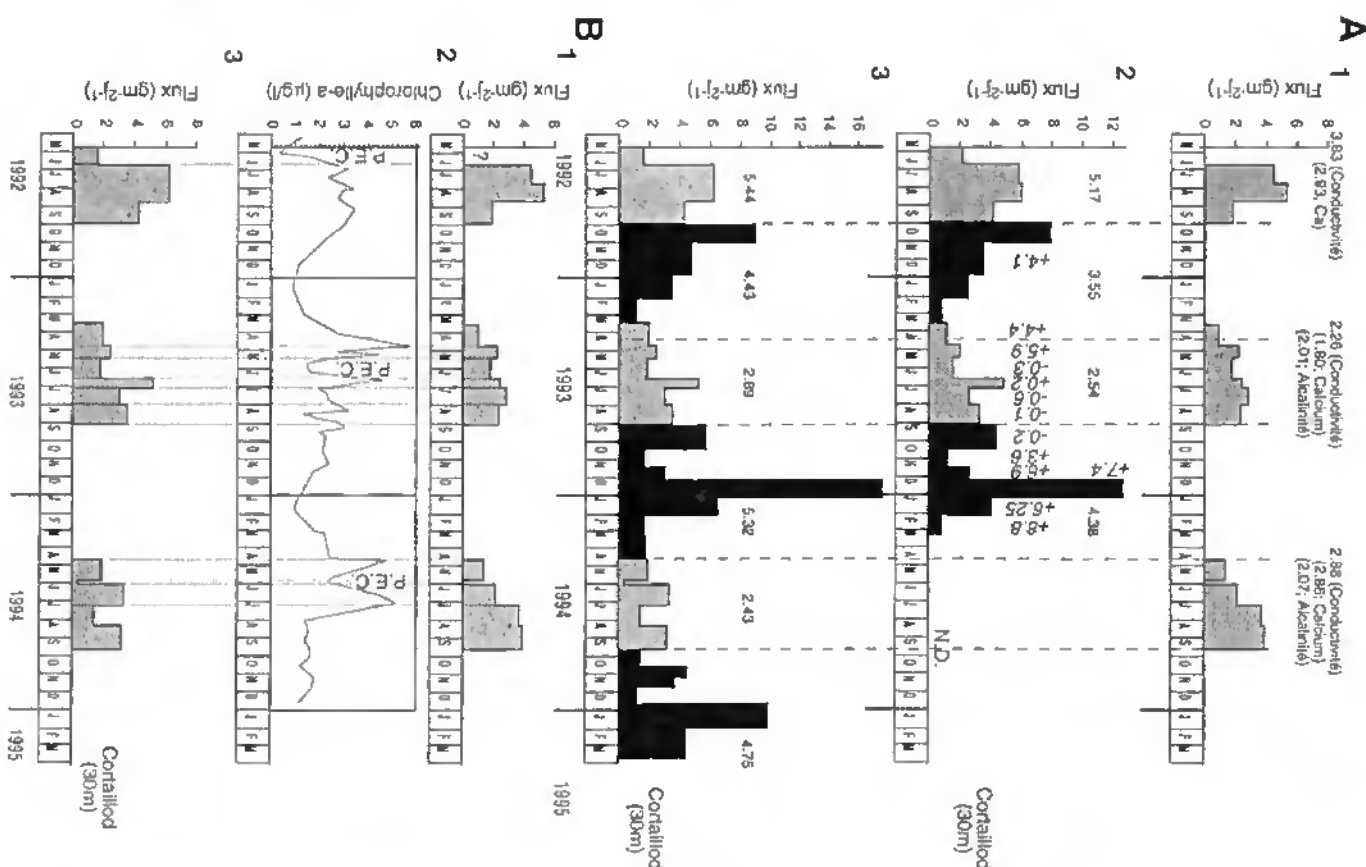
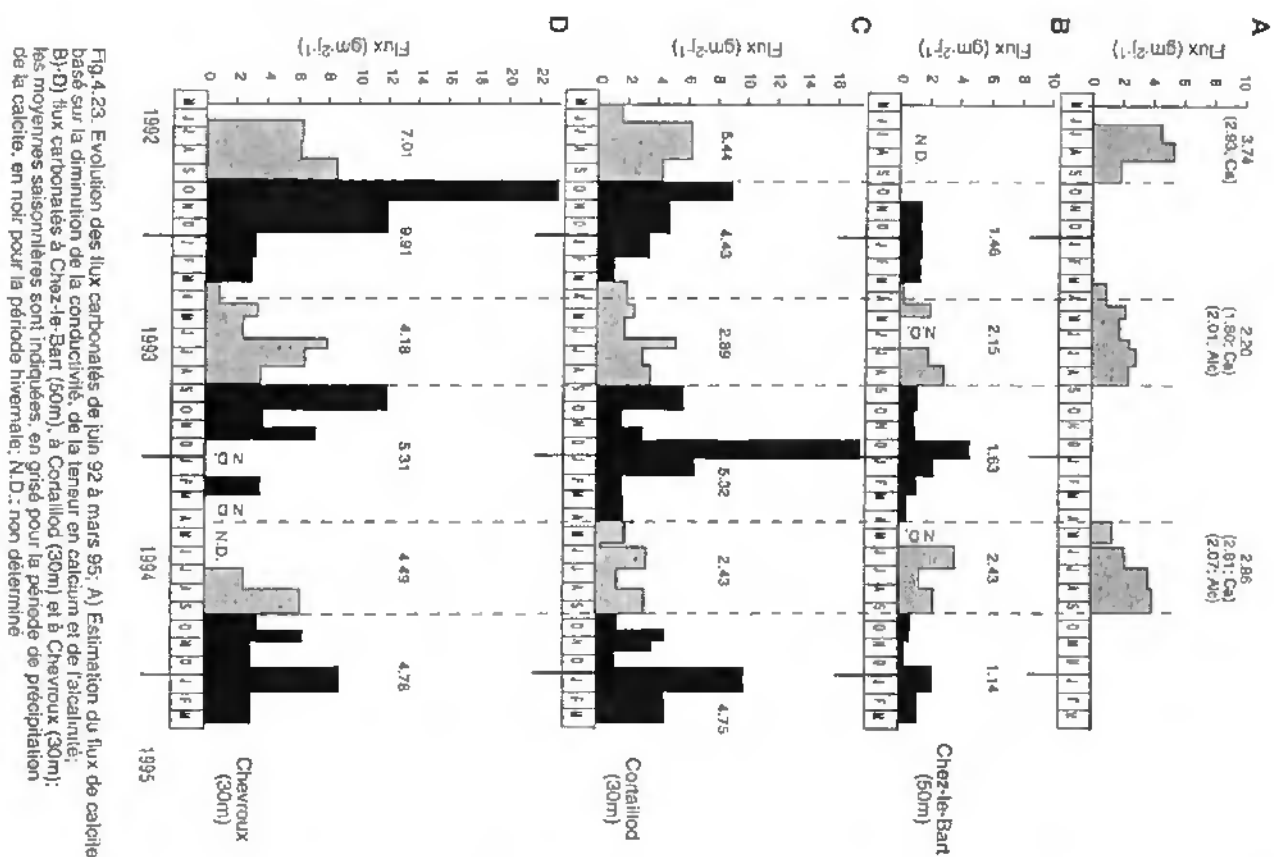


Fig.4.24B. Comparaison entre les flux carbonatés et la concentration en chlorophylle-a sur la diminution épilimnique de la conductivité (d'après équation 4-5); 1) Estimation du flux de calcium basé sur la diminution épilimnique de la conductivité (d'après équation 4-5); 2) Concentration épilimnique en chlorophylle-a [P.E.C.: phase d'eau claire]; 3) Flux carbonate à Cortailod (30m)

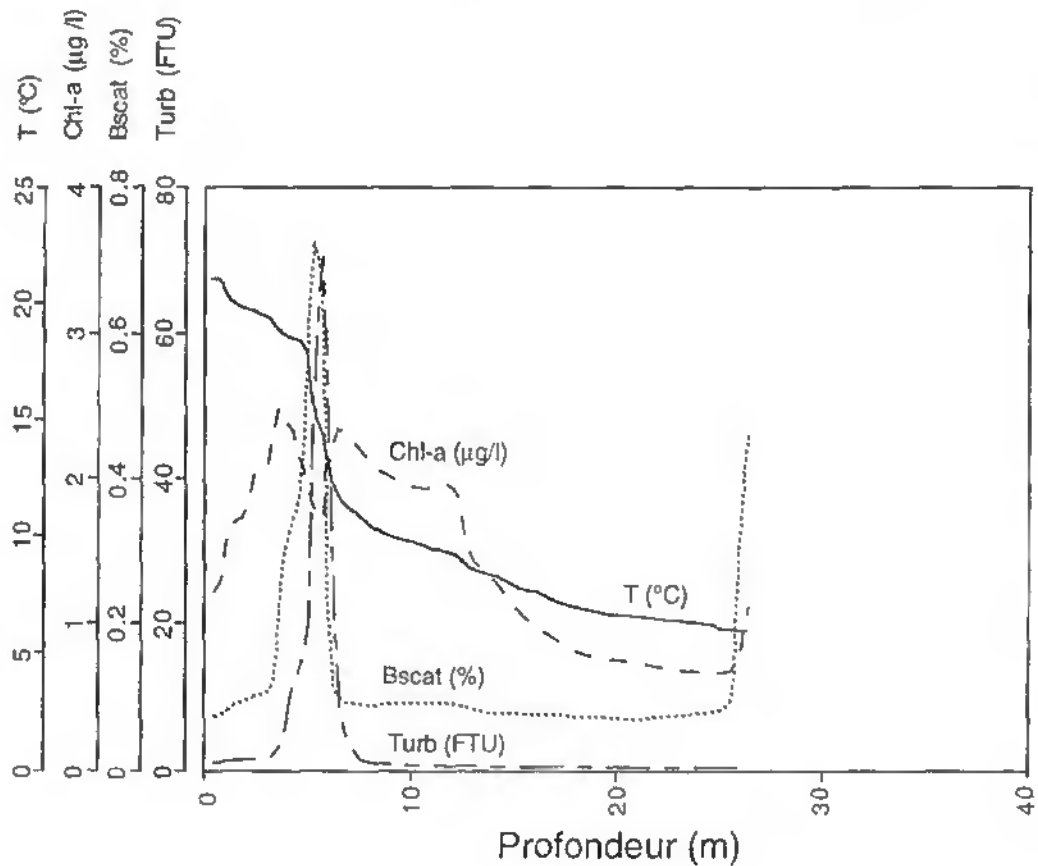


Fig.4.25. Turbidités et rétrodiffusions record en base d'épélimnion lors d'une précipitation de calcite, station INTE25, le 30 juin 1993

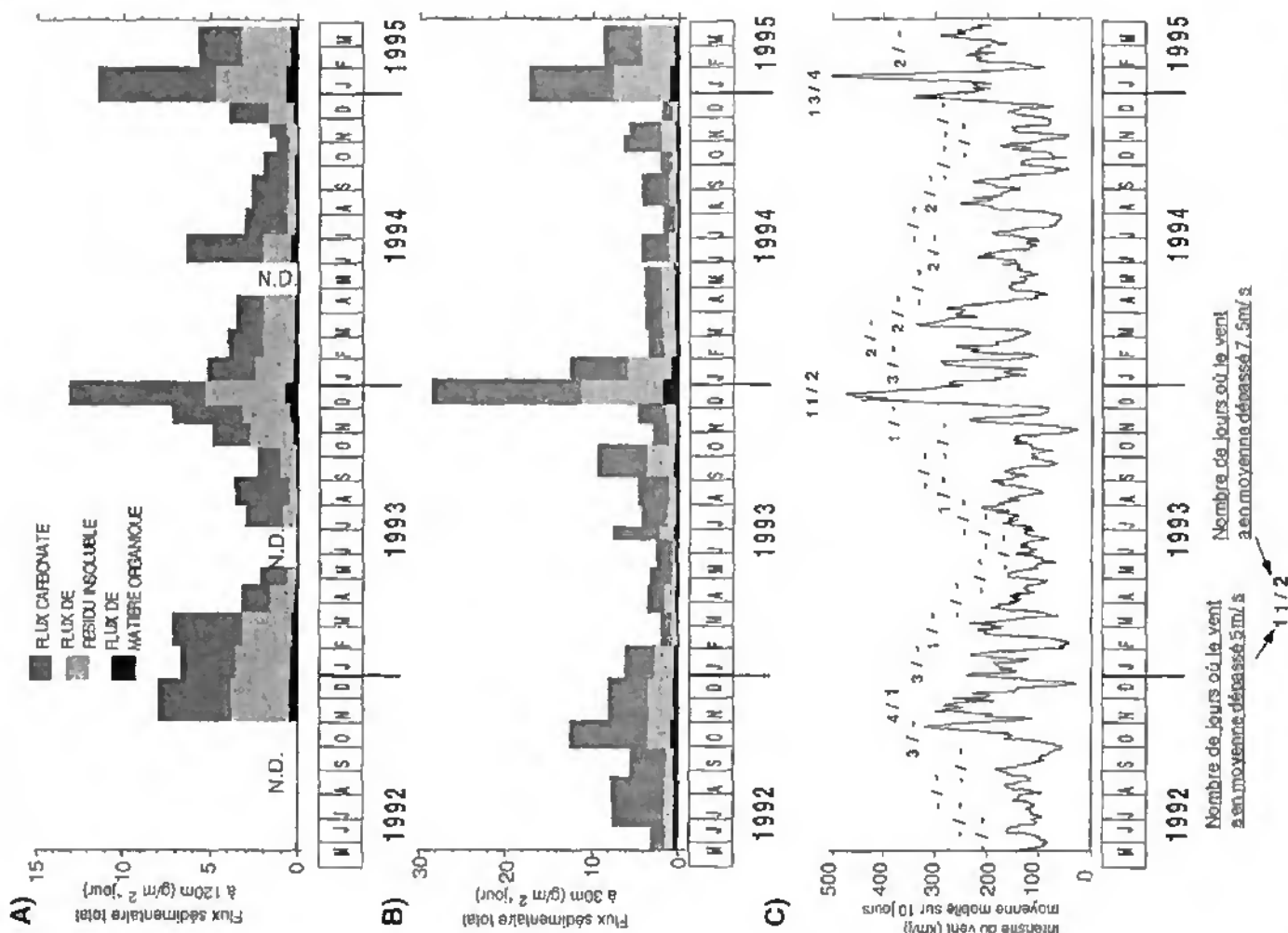


Fig.4.26. Comparaison de l'évolution des flux totaux à Chez-le-Bart (A) et Cortailod (B) avec l'intensité du vent (C); N.D.: non déterminé

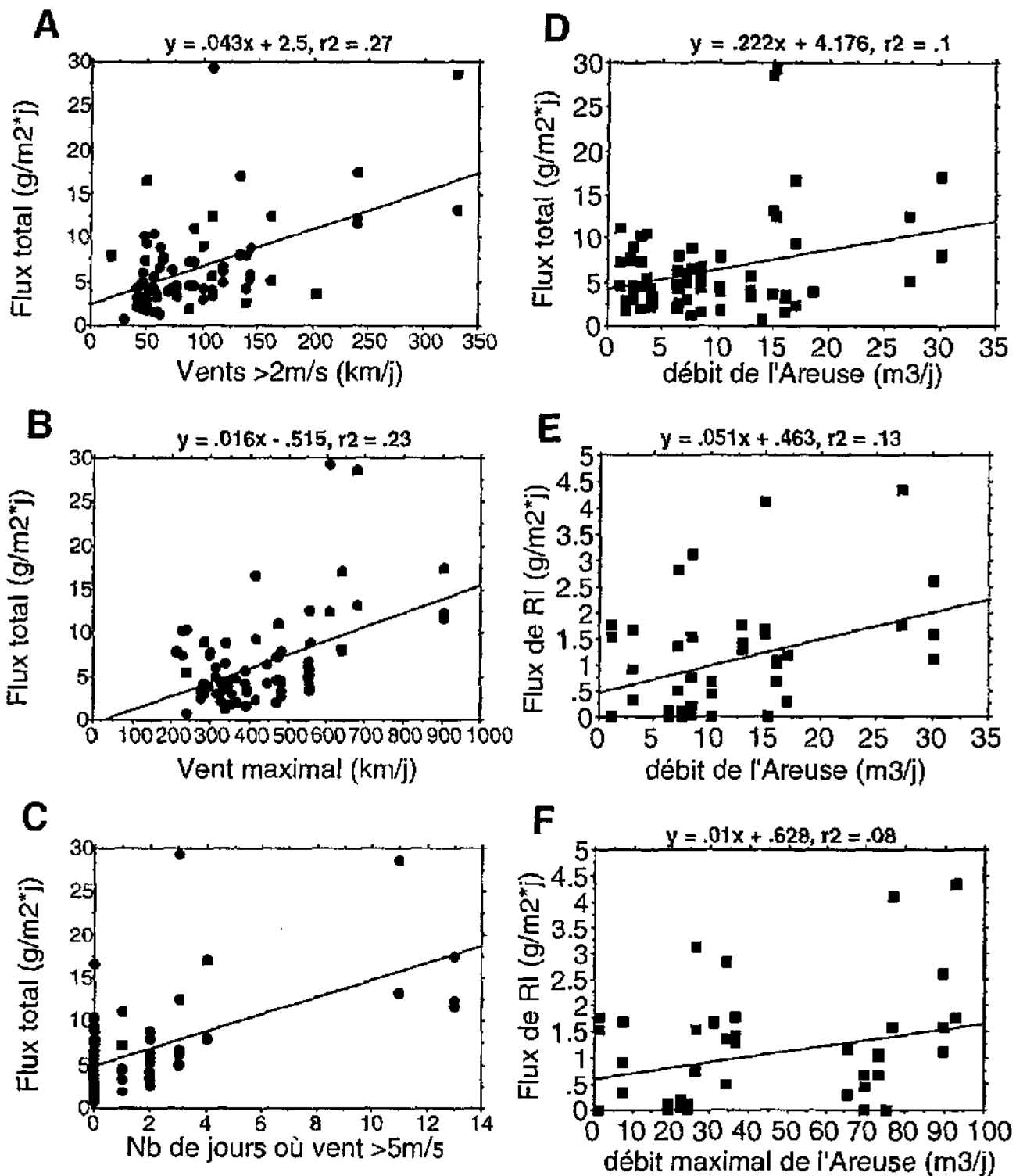
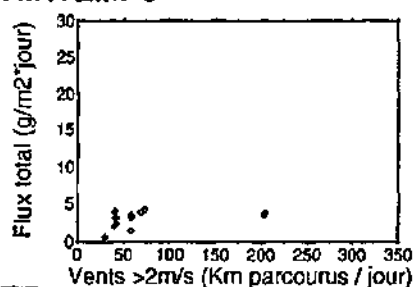
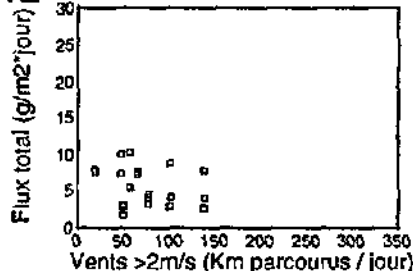


Fig.4.27. Comparaison entre les flux totaux et l'intensité du vent d'une part, le débit de l'Areuse d'autre part; A) flux total versus moyenne des vents supérieurs à 2m/s en moyenne journalière; B) flux total versus kilomètres maximaux parcourus par le vent en un jour; C) flux total versus nombre de jours de la période où le vent a dépassé en moyenne 5m/s; D) flux total versus débit moyen de l'Areuse; E) flux de résidu insoluble versus débit moyen de l'Areuse; F) flux de résidu insoluble versus débit de l'areuse le jour où il a été maximal

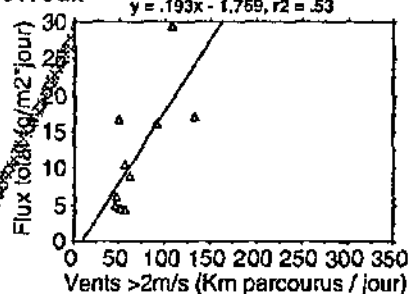
PRINTEMPS



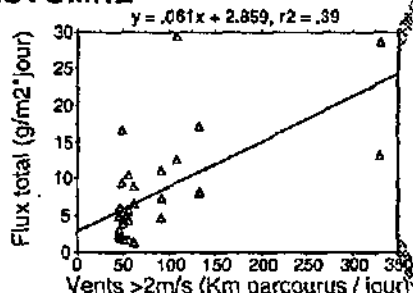
ETE



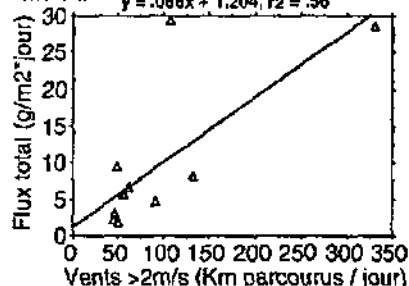
Chevroix



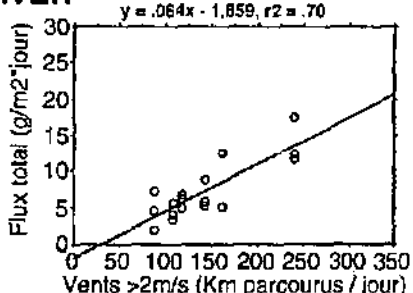
AUTOMNE



Cortaillod



HIVER



Chez-le-Bart

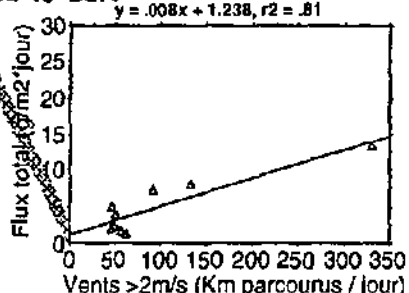


Fig.4.28. Evolution saisonnière des flux totaux en fonction de la moyenne des kilomètres parcourus par les vents de plus de 2m/s en moyenne journalière; distinction des trois stations en automne

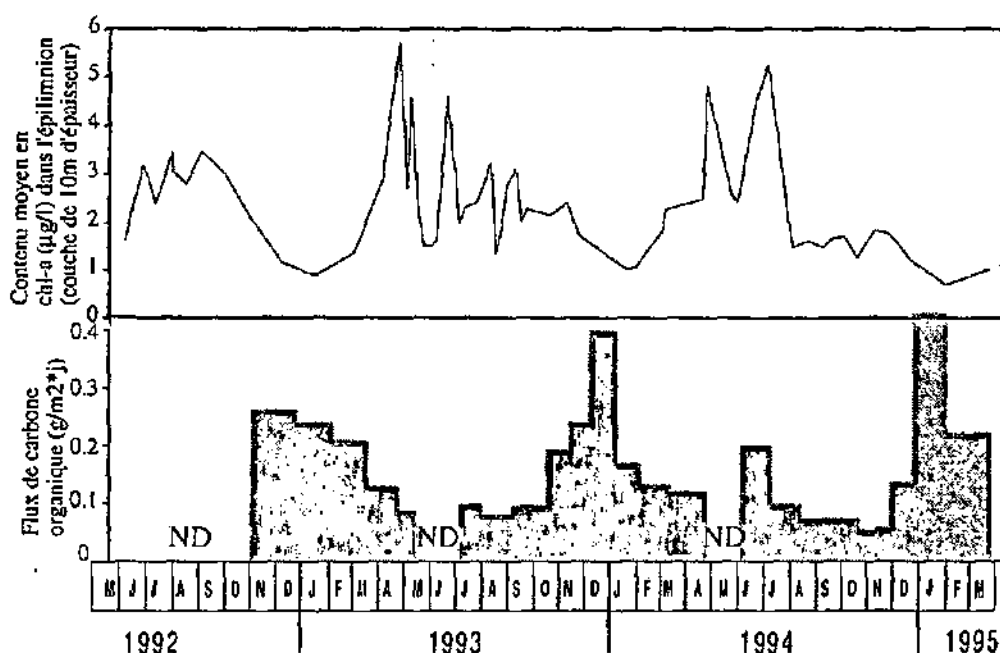


Fig.4.29. Comparaison entre l'évolution de la teneur épilimnique en chlorophylle-a et celle du flux de carbone organique à la station de Chez-le-Bart (à 120m de profondeur); ND: non déterminé

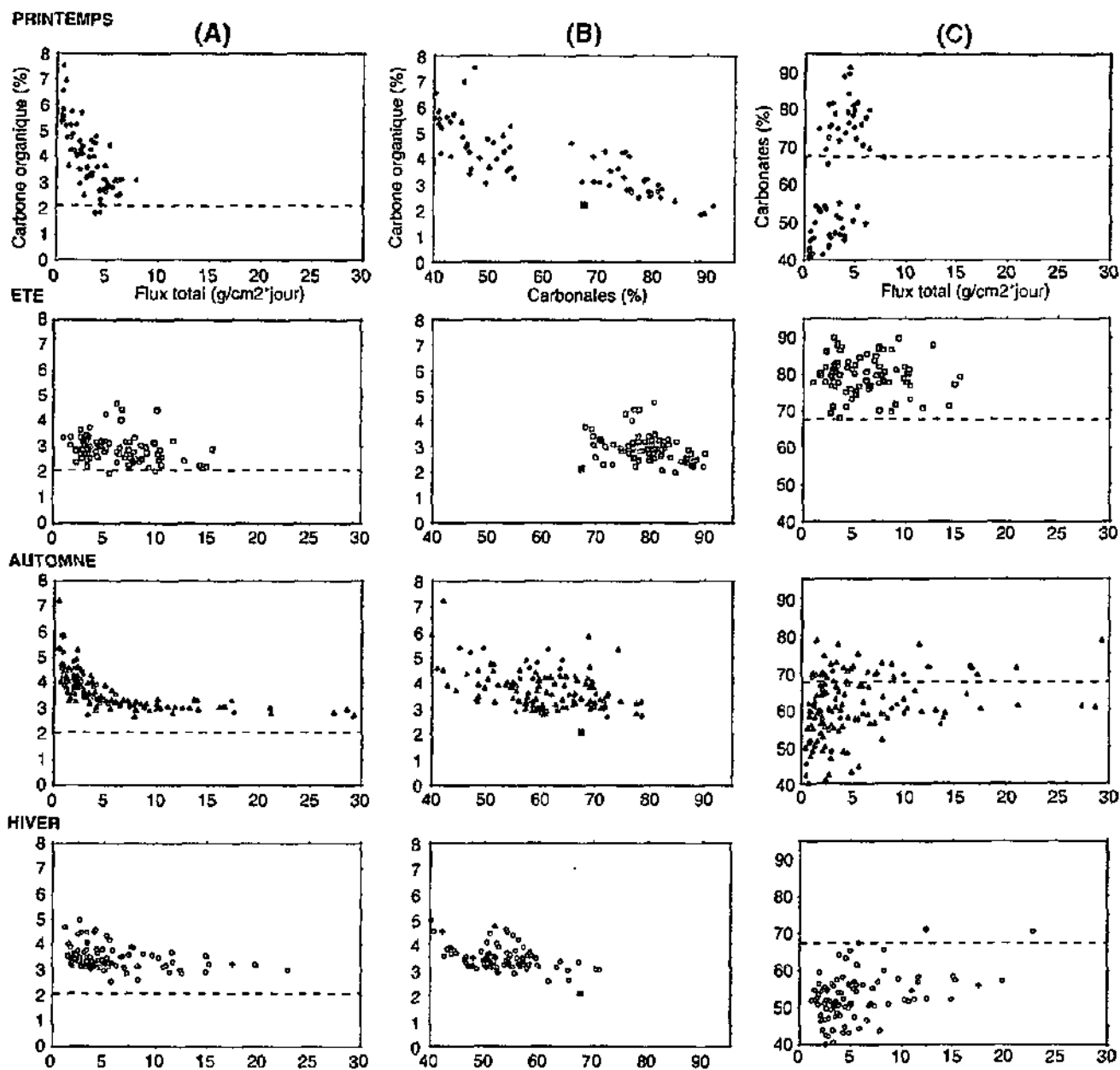
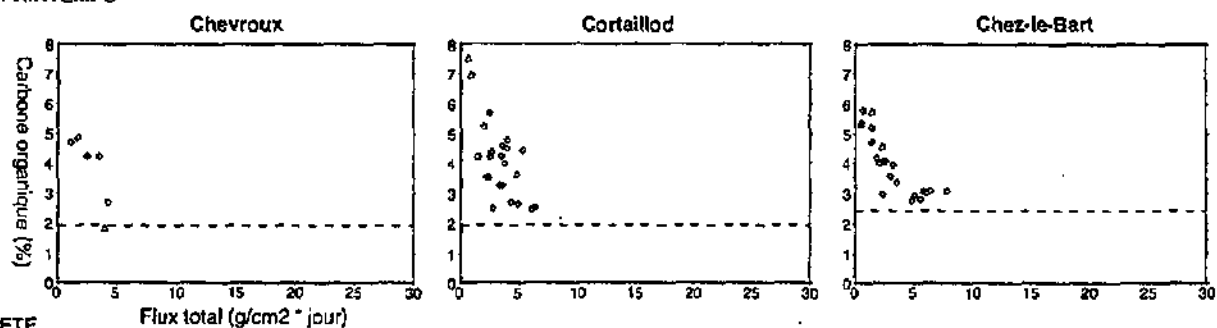
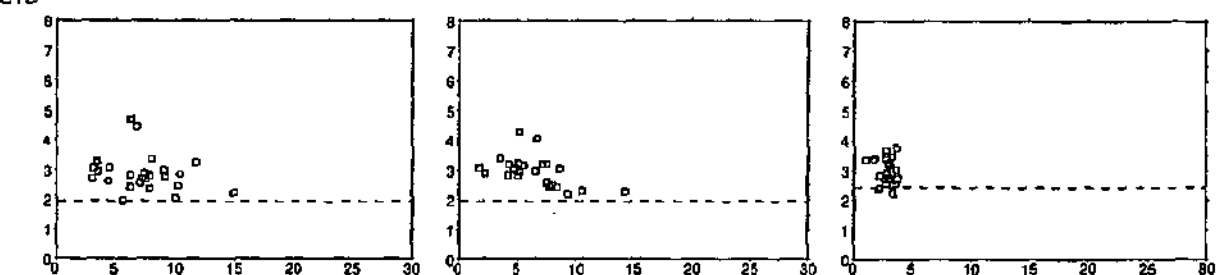


Fig.4.30. Evolution saisonnière de la composition générale du matériel récolté et comparaison avec la composition moyenne du sédiment de surface des trois stations concernées (lignes traitillées en A et C, carré plein en B);
 A) Carbone organique versus flux total, B) Carbone organique versus carbonate;
 C) Carbonates versus flux total

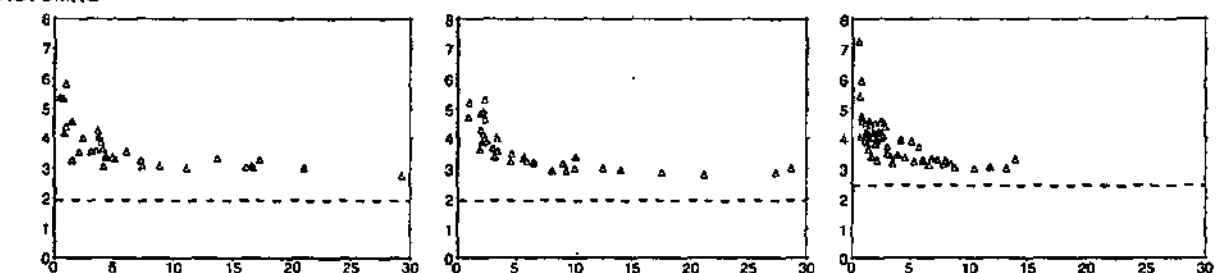
PRINTEMPS



ETE



AUTOMNE



HIVER

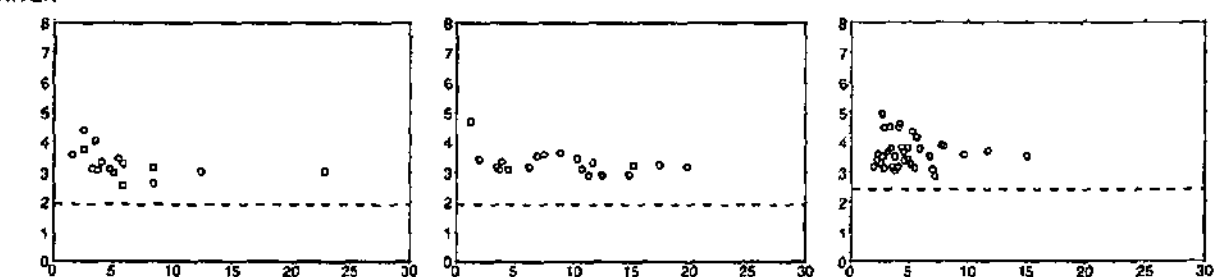
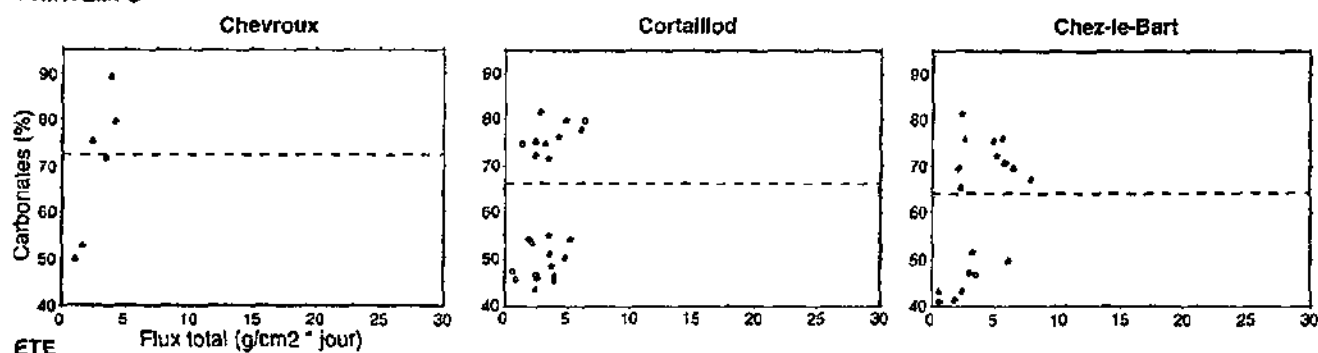
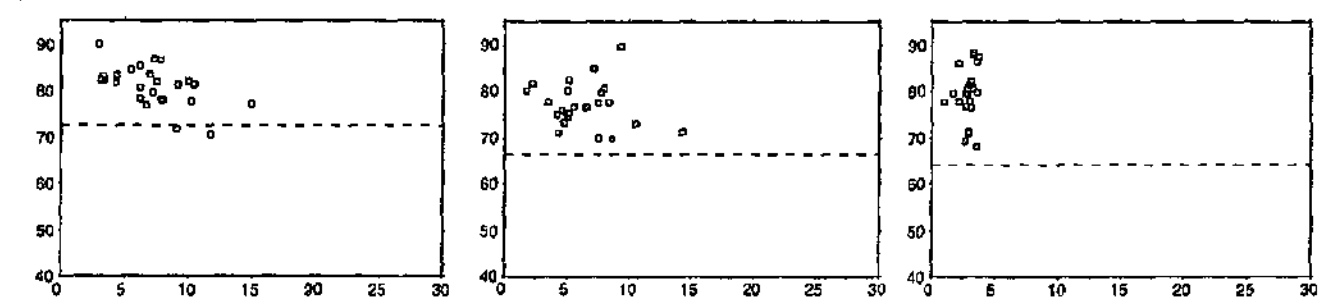


Fig.4.31. Pourcentage de carbone organique dans le matériel des plages en fonction du flux total; différenciation par station et par saison; comparaison avec la composition moyenne du sédiment de surface de la station considérée; remarquez, surtout en automne et également en hiver, la tendance asymptotique vers la composition moyenne du sédiment de surface

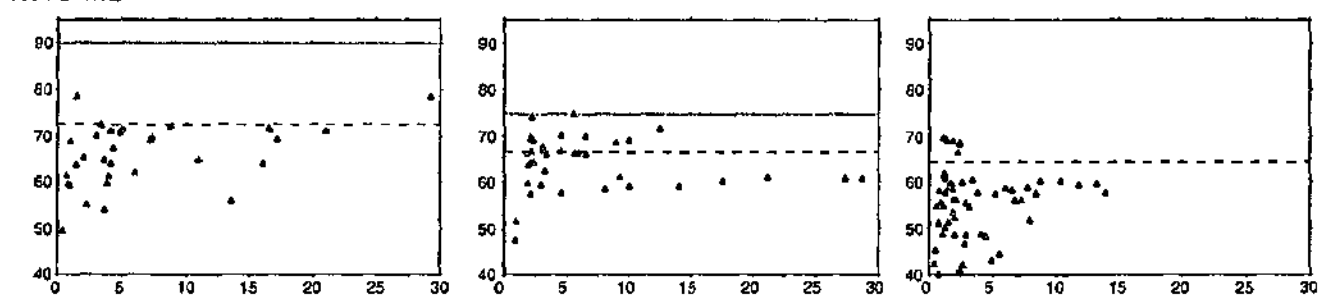
PRINTEMPS



ETE



AUTOMNE



HIVER

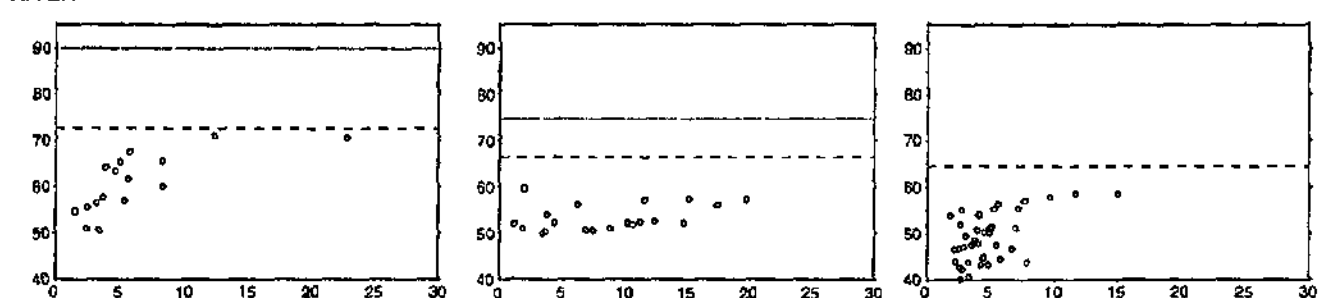
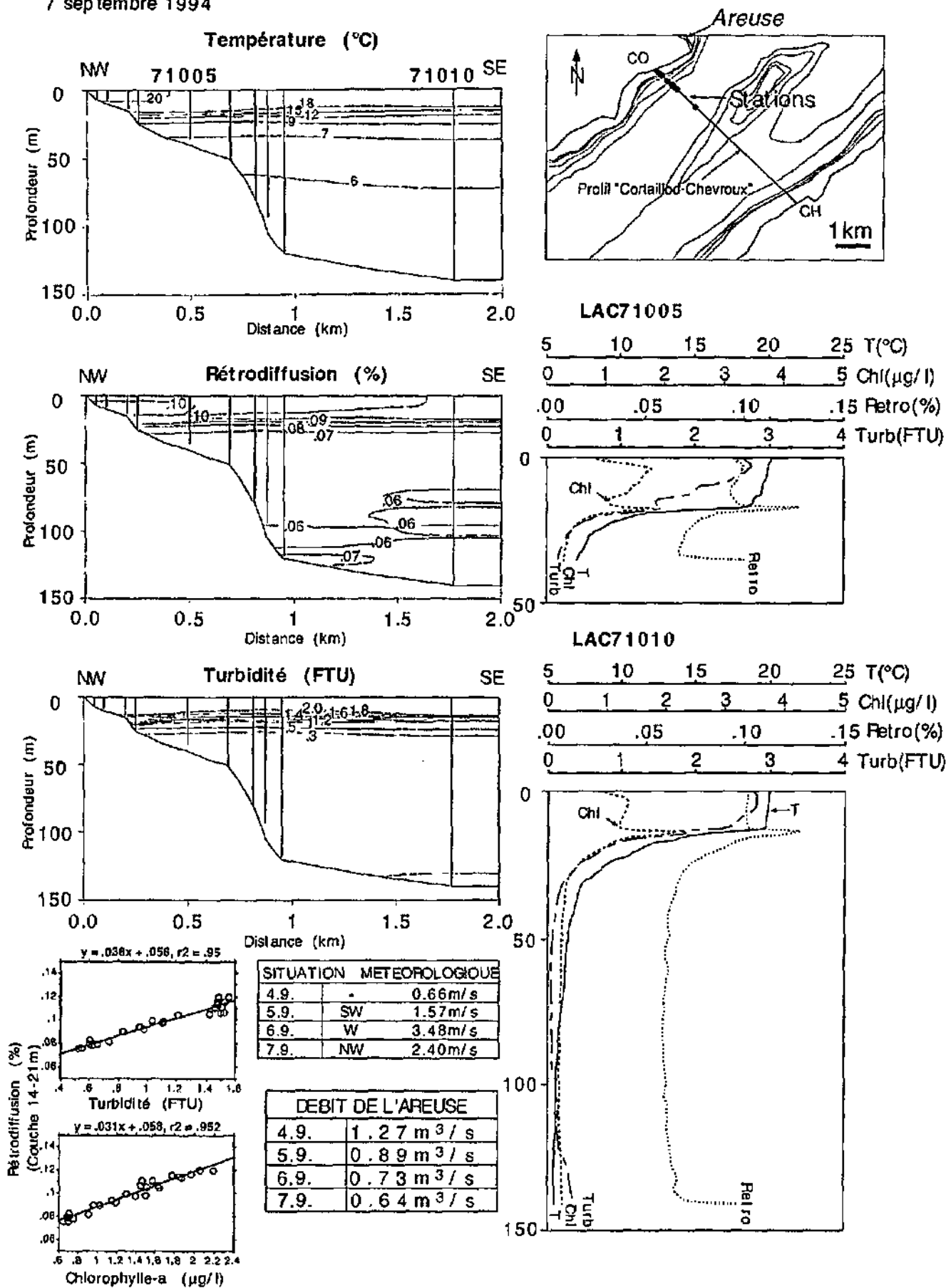
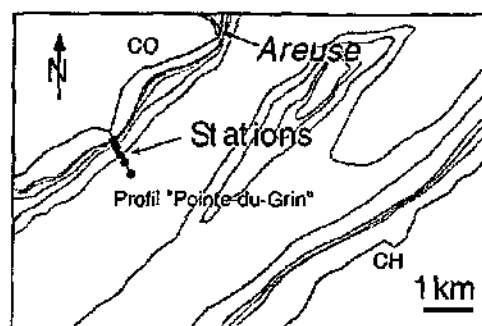
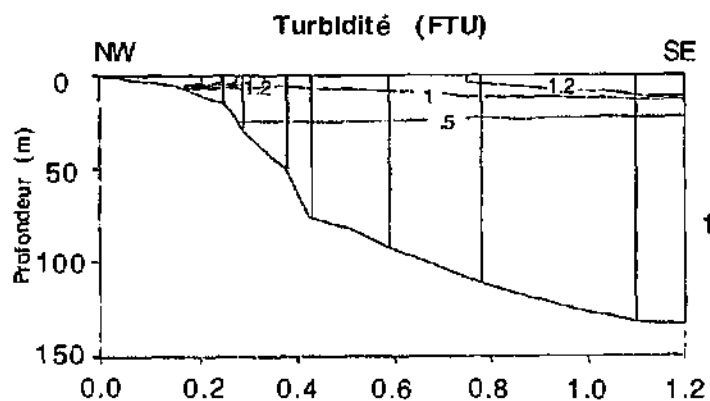
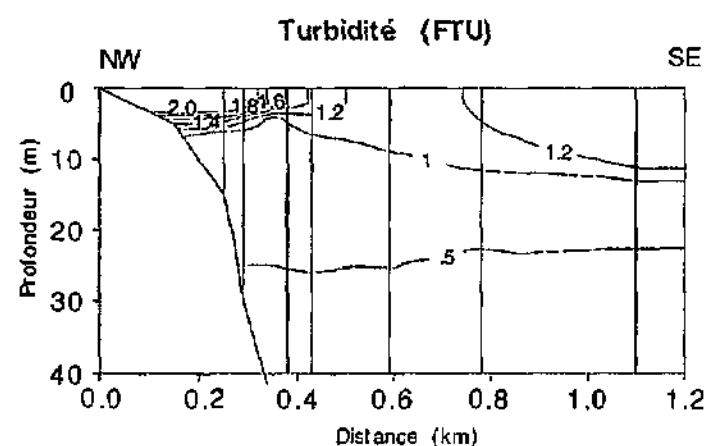
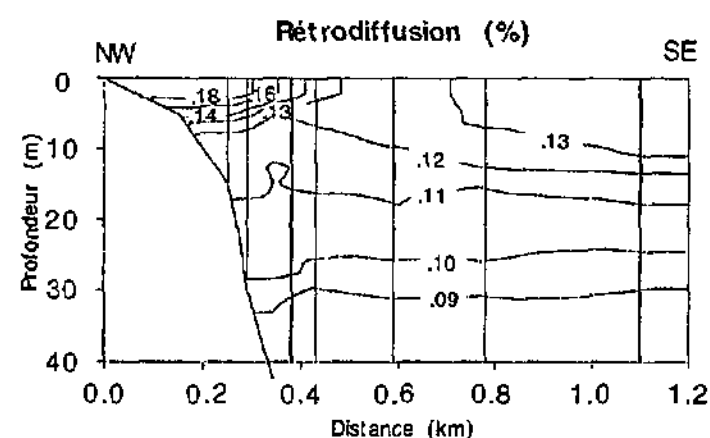
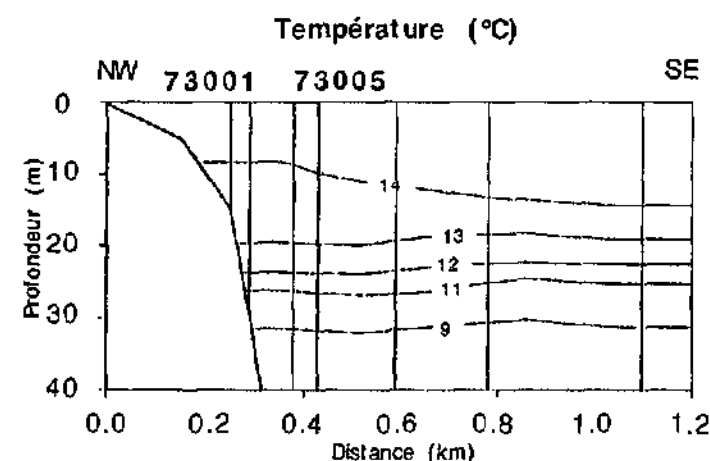


Fig.4.32. Evolution du pourcentage de carbonates en fonction du flux total pour chaque station et chaque saison, et comparaison avec la composition moyenne du sédiment de surface (ligne traitillée); ligne pointillée: pourcentage de carbonates du sédiment de surface de respectivement la beine sud (carotte C17) et de la beine nord (C11)

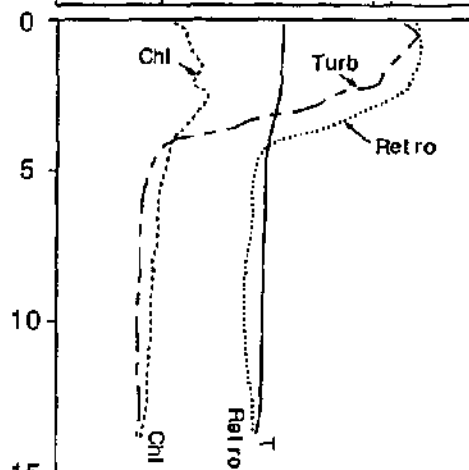
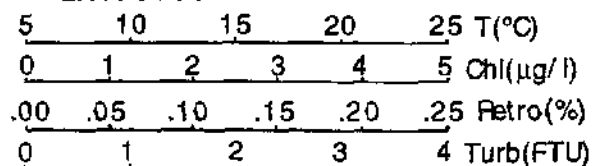
7 septembre 1994



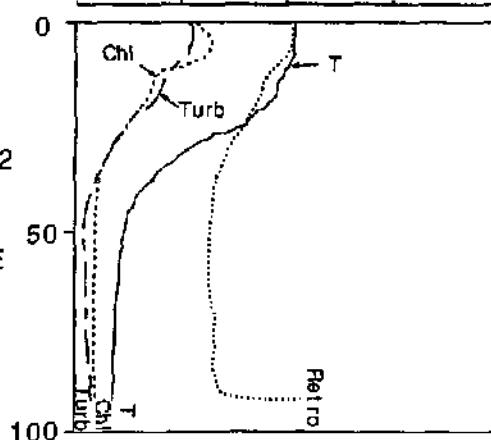
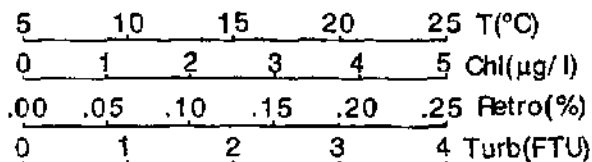
3 octobre 1994



LAC73001



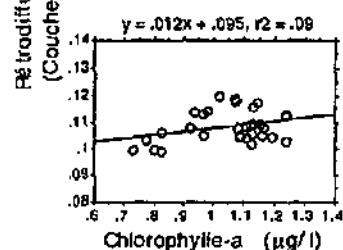
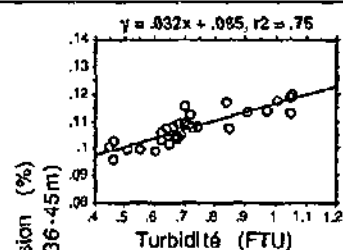
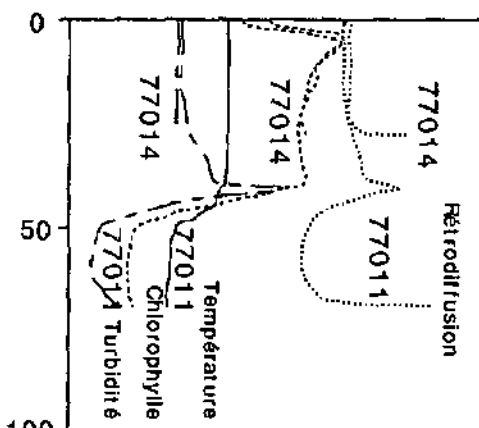
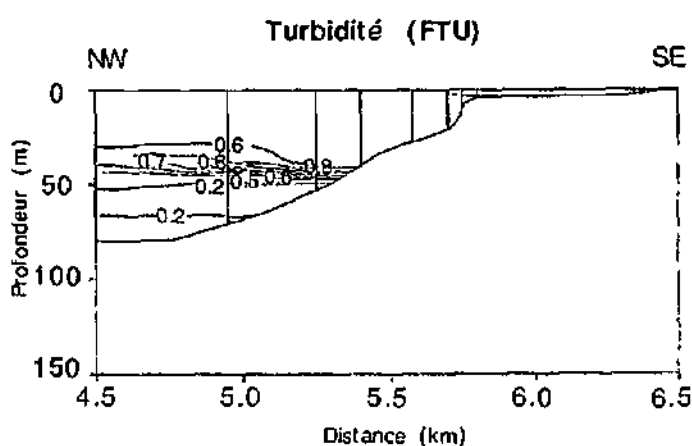
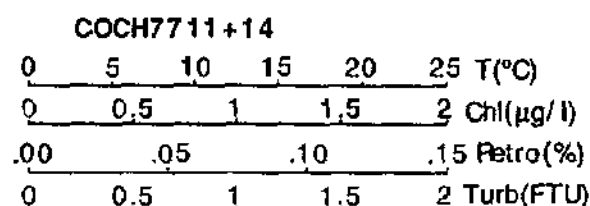
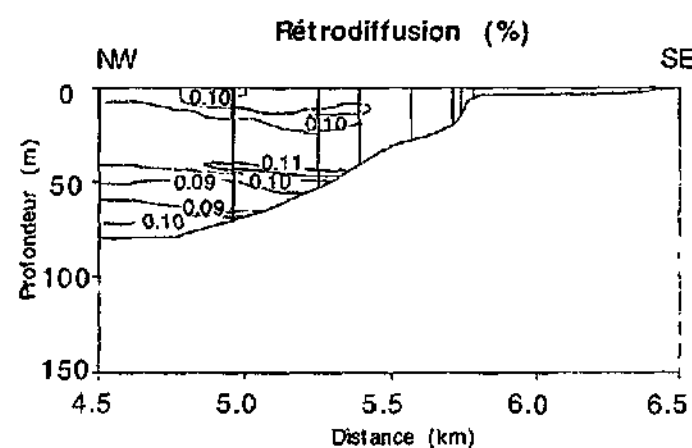
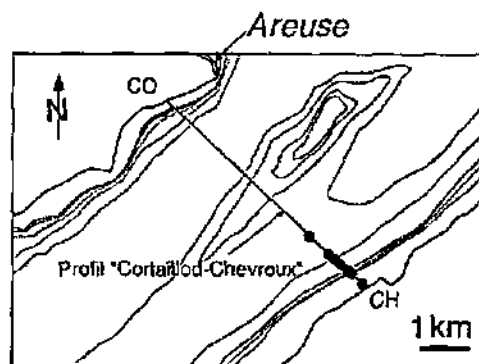
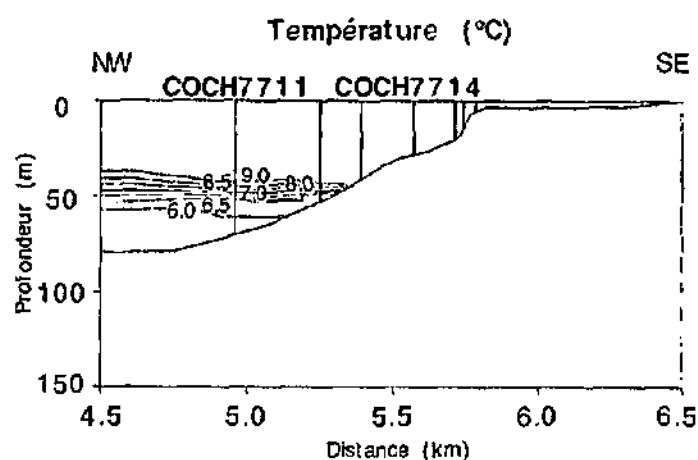
LAC73005



SITUATION METEOROLOGIQUE		
30.9.	-	0.30m/s
1.10.	-	0.19m/s
2.10.	-	0.80m/s
3.10.	SW	2.43m/s

Fig.4.34. Transect au large de la Pointe du Grin, le 3.10.94 (Campagne 73); Remarquez les valeurs élevées de la rétrodiffusion et de la turbidité en surface dans la zone côtière

6 décembre 1994



SITUATION METEOROLOGIQUE		
3.12.	-	0.42m/s
4.12.	SW	0.90m/s
5.12.	W	2.75m/s
6.12.	SW	2.00m/s

Fig.4.35. Transect au large de Chevroux, le 6.12.94 (Campagne 77); Remarquez les valeurs élevées de la rétrodiffusion et de la turbidité en base d'épilimnion

10 décembre 1992

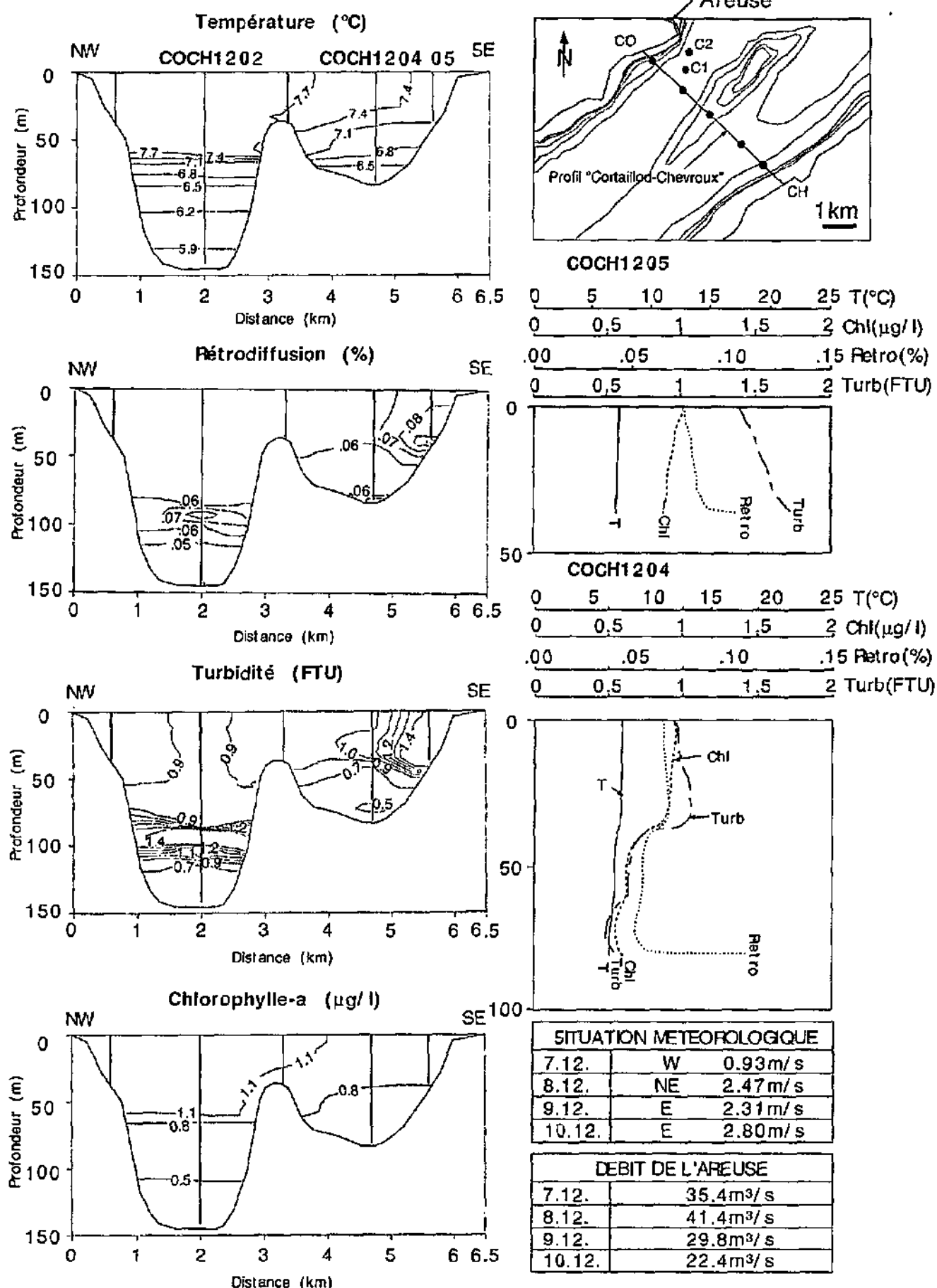
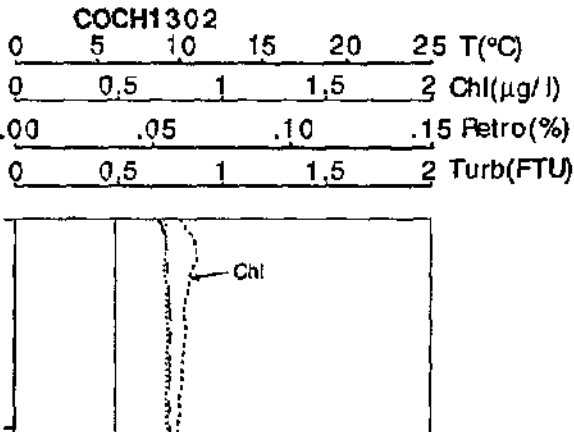
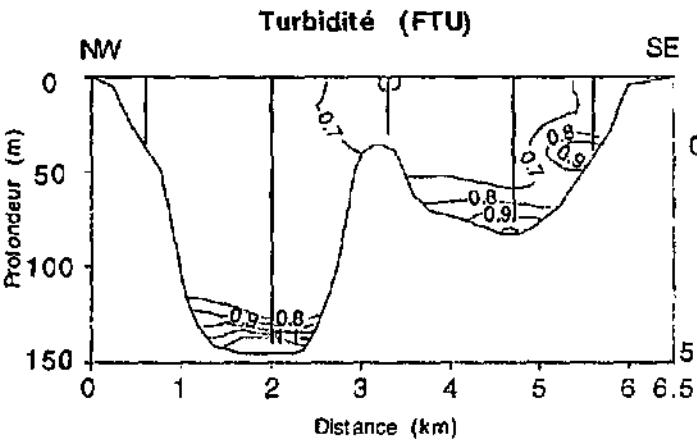
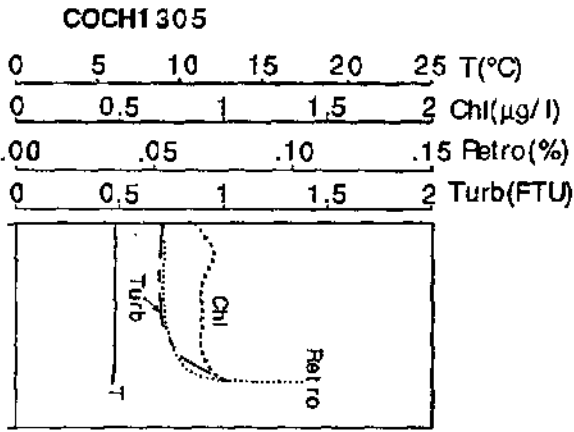
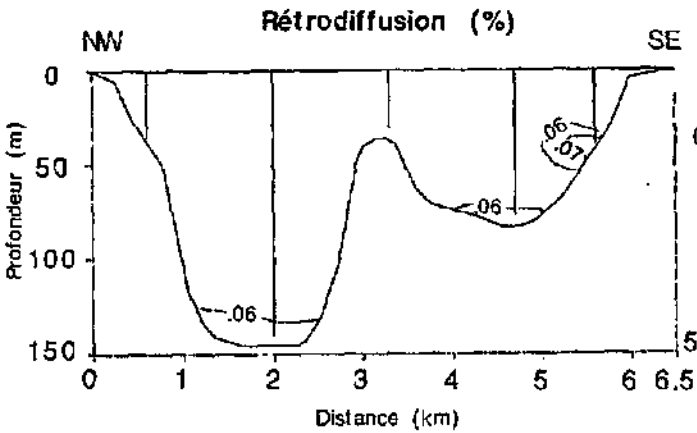
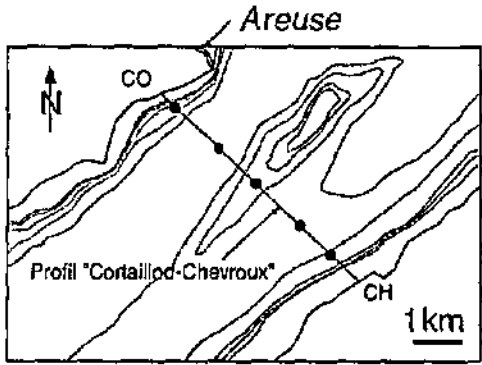
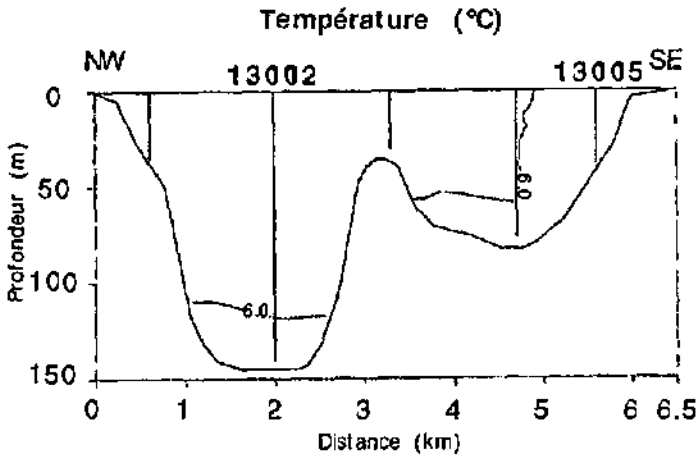


Fig.4.36. Transect Cortailod- Chevroux, le 10.12.92 (Campagne 12); Remarquez les valeurs élevées de la rétrodiffusion et de la turbidité dans la couche épilimnique du bassin SE ainsi que vers 100m de profondeur à la station COCH02

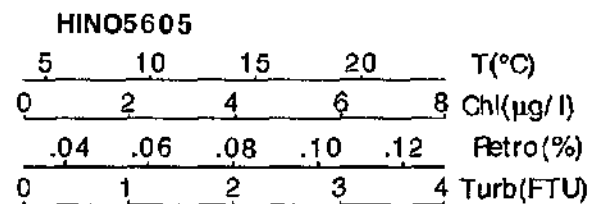
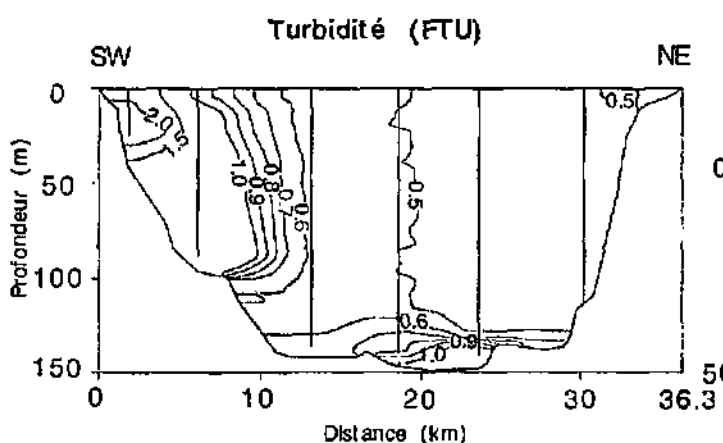
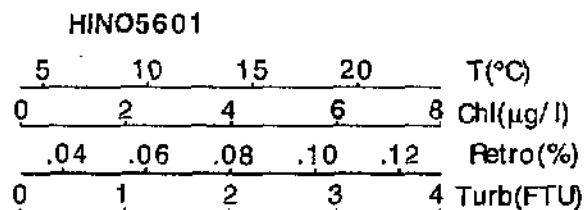
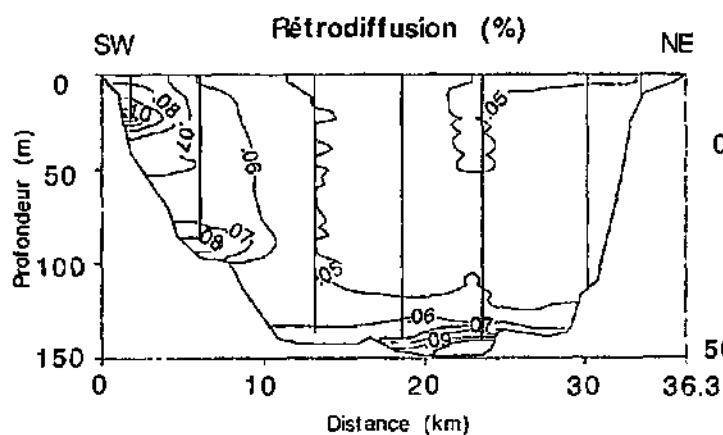
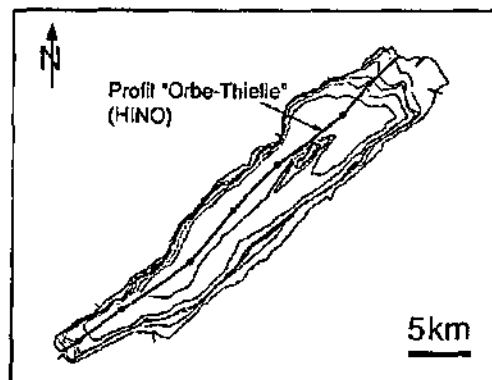
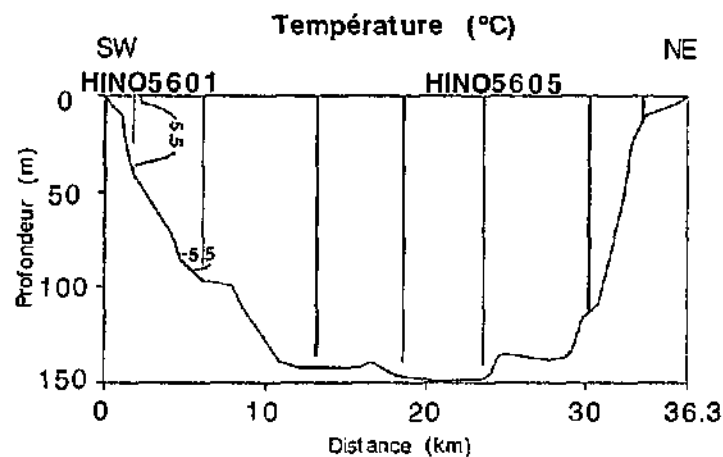
18 janvier 1993



SITUATION METEOROLOGIQUE		
15.1.	-	0.88m/s
16.1.	-	0.20m/s
17.1.	SW	0.78m/s
18.1.	-	0.19m/s

Fig.4.37. Transect Cortailod- Chevroux, le 18.1.93 (Campagne 13); Remarquez l'augmentation exponentielle de la rétrodiffusion et de la turbidité à proximité du fond

19 janvier 1994



SITUATION METEOROLOGIQUE		
16.1.	E	0.16m/s
17.1.	E	3.17m/s
18.1.	E	1.49m/s
19.1.	E	0.44m/s

DEBIT DE LA THIELLE (ORBE)	
16.1.	18.5m³/s
17.1.	17.0m³/s
18.1.	19.7m³/s
19.1.	16.2m³/s

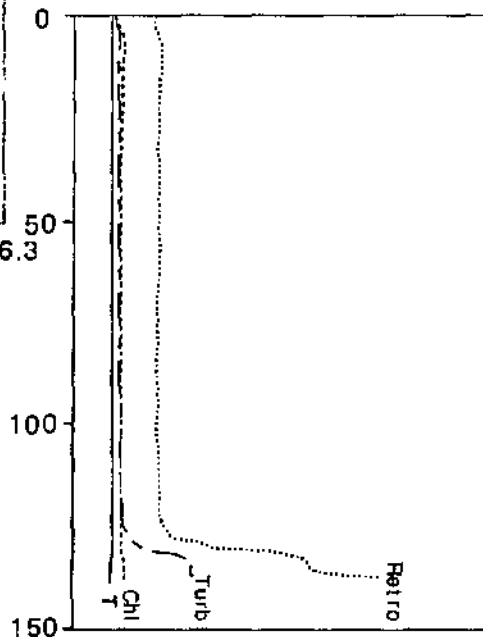


Fig.4.38. Transect Orbe-Thielle, le 19.1.94 (Campagne 56); Remarquez les valeurs élevées de la rétrodiffusion et de la turbidité dans le Haut-lac ainsi qu'à proximité du fond

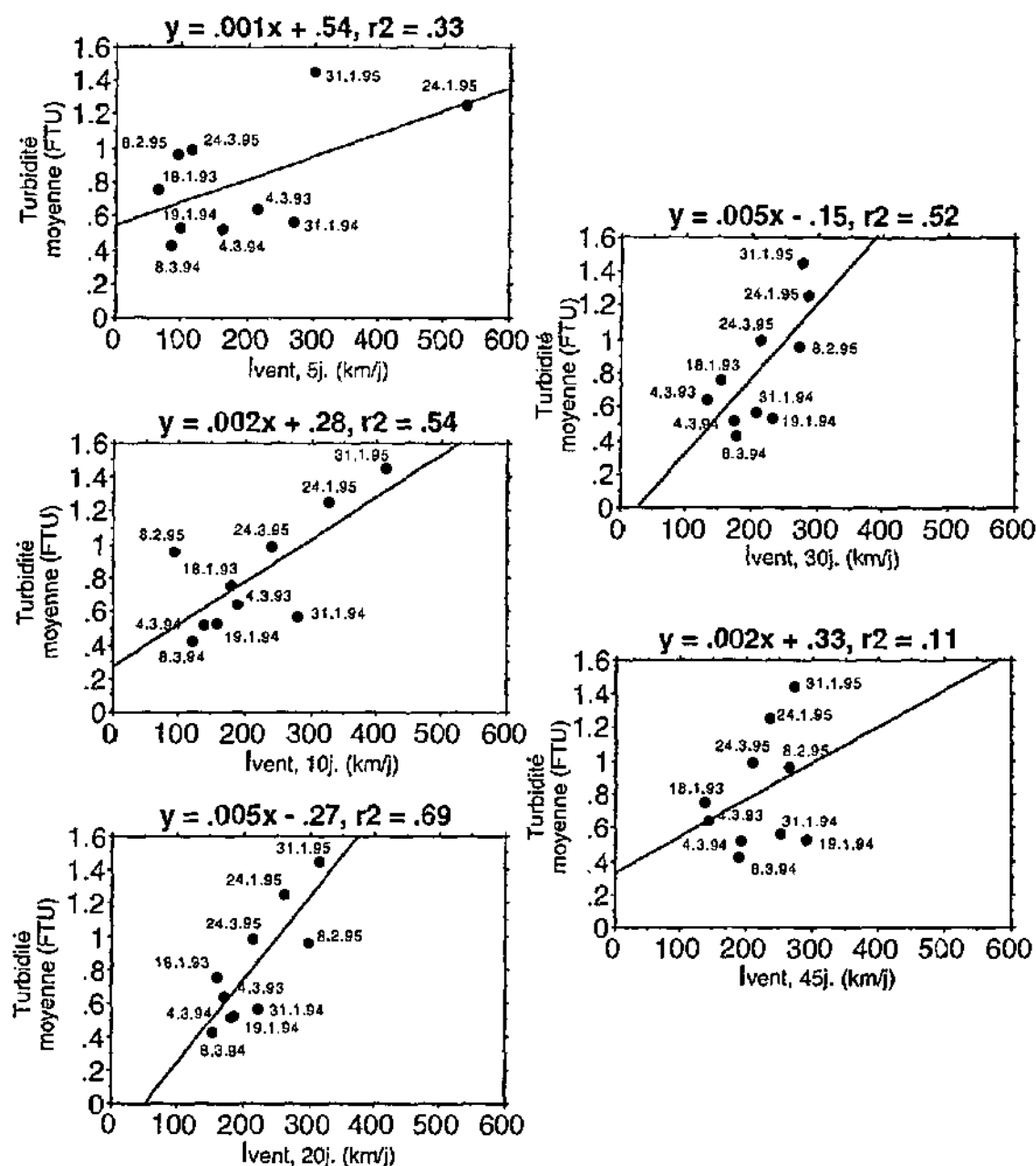


Fig.4.40. Comparaison entre la turbidité moyenne du lac (moyenne des mesures de 3 stations) et la moyenne de l'intensité du vent (en km/jour) ayant régné les 5, 10, 20, 30 et 45 jours qui précèdent les campagnes de mesures; saison hivernale non stratifiée uniquement

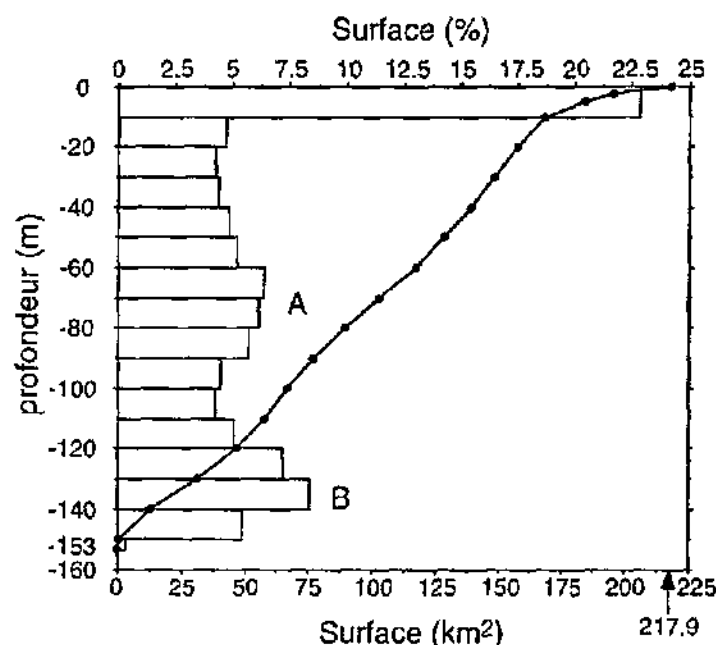


Fig.4.41. Courbe hypsométrique du lac de Neuchâtel; A: Maxima correspondant aux profondeurs du bassin SE; B: Maxima correspondant aux profondeurs du bassin NW

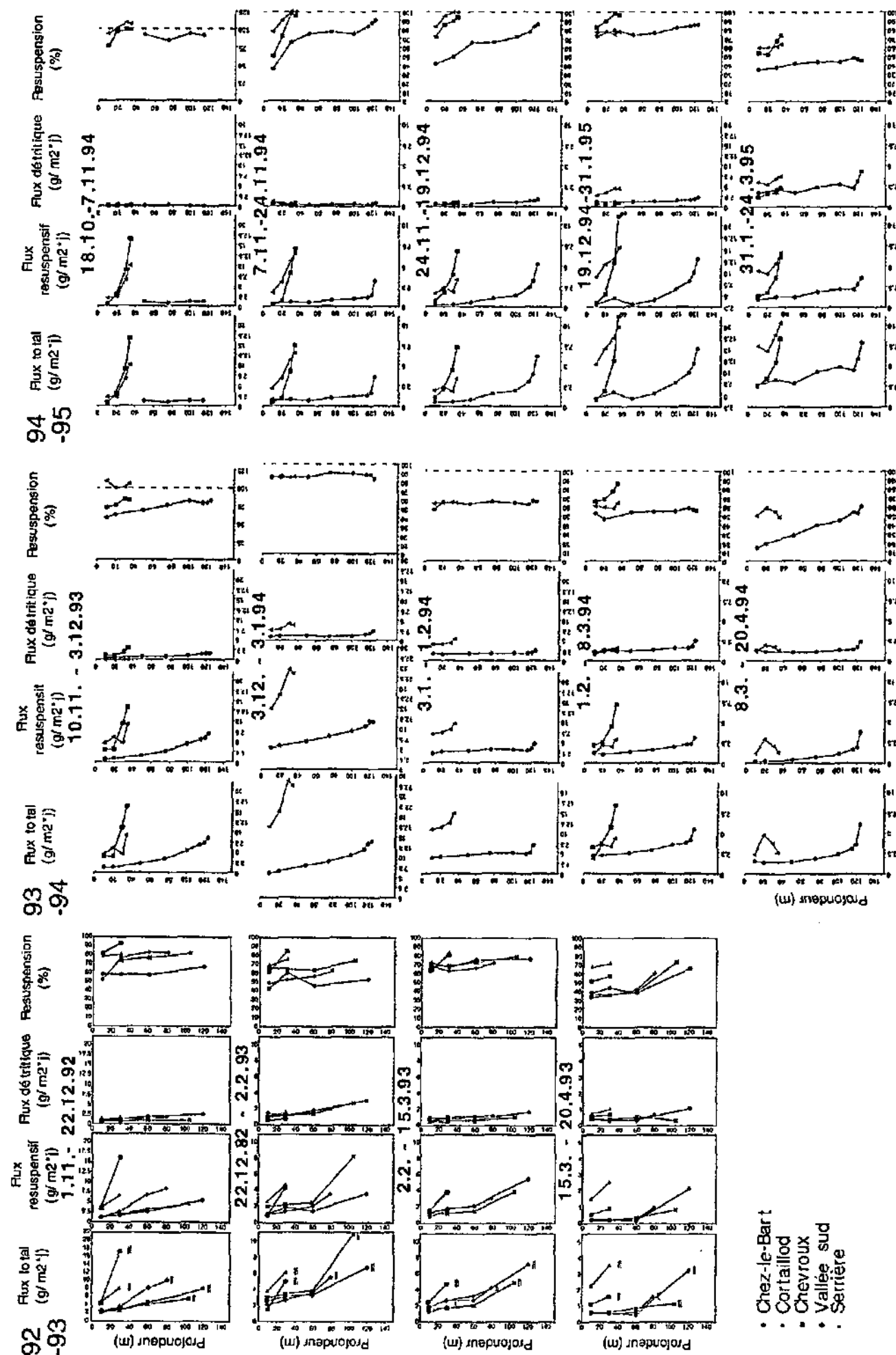


Fig.4.42. Estimation du flux resuspension, du flux détritique et du pourcentage de resuspension lors des périodes hivernales 92-93, 93-94 et 94-95

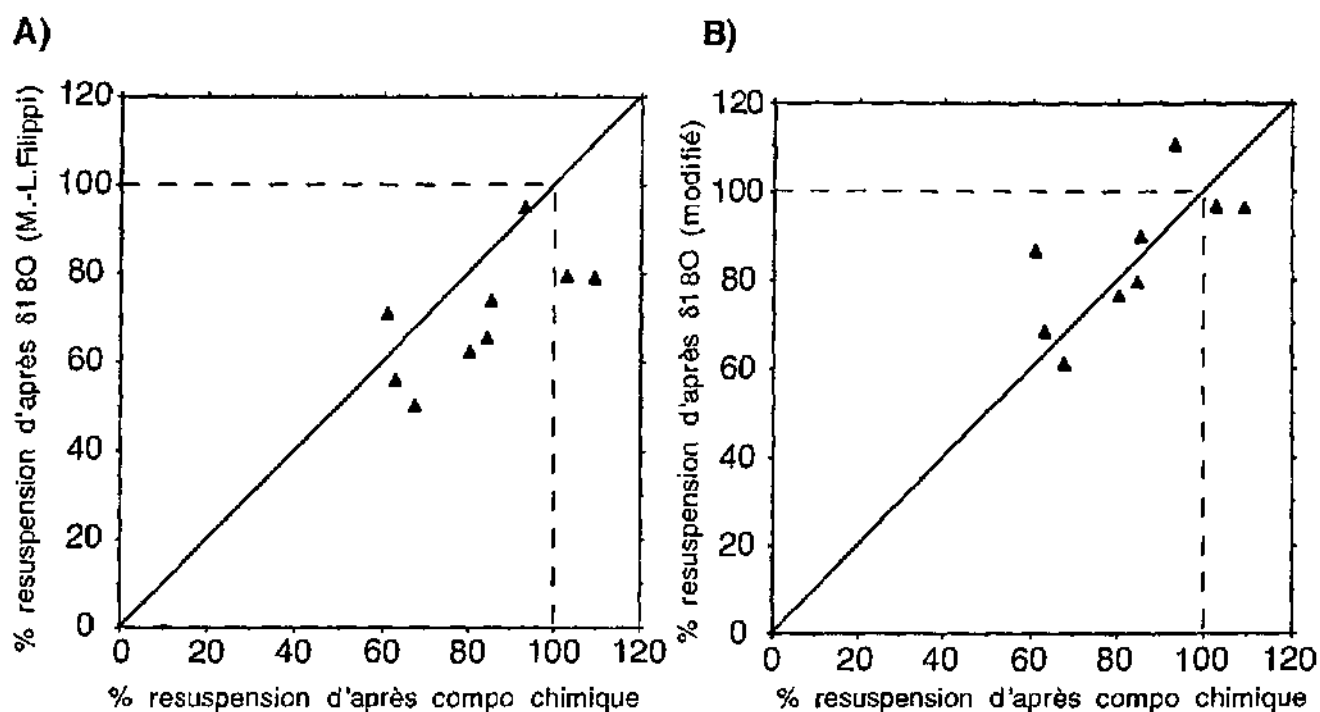


Fig.4.43. Comparaison entre le pourcentage de resuspension calculé d'après le rapport $\delta^{18}\text{O}$ et celui estimé par notre méthode; A) Pourcentage de resuspension ($\delta^{18}\text{O}$) de Filippi et al. (1998); B) Pourcentage de resuspension ($\delta^{18}\text{O}$) de Filippi et al. (1998), modifié en tenant compte des carbonates allochtones; les droites de pente égale à 1 sont présentées afin de faciliter la comparaison

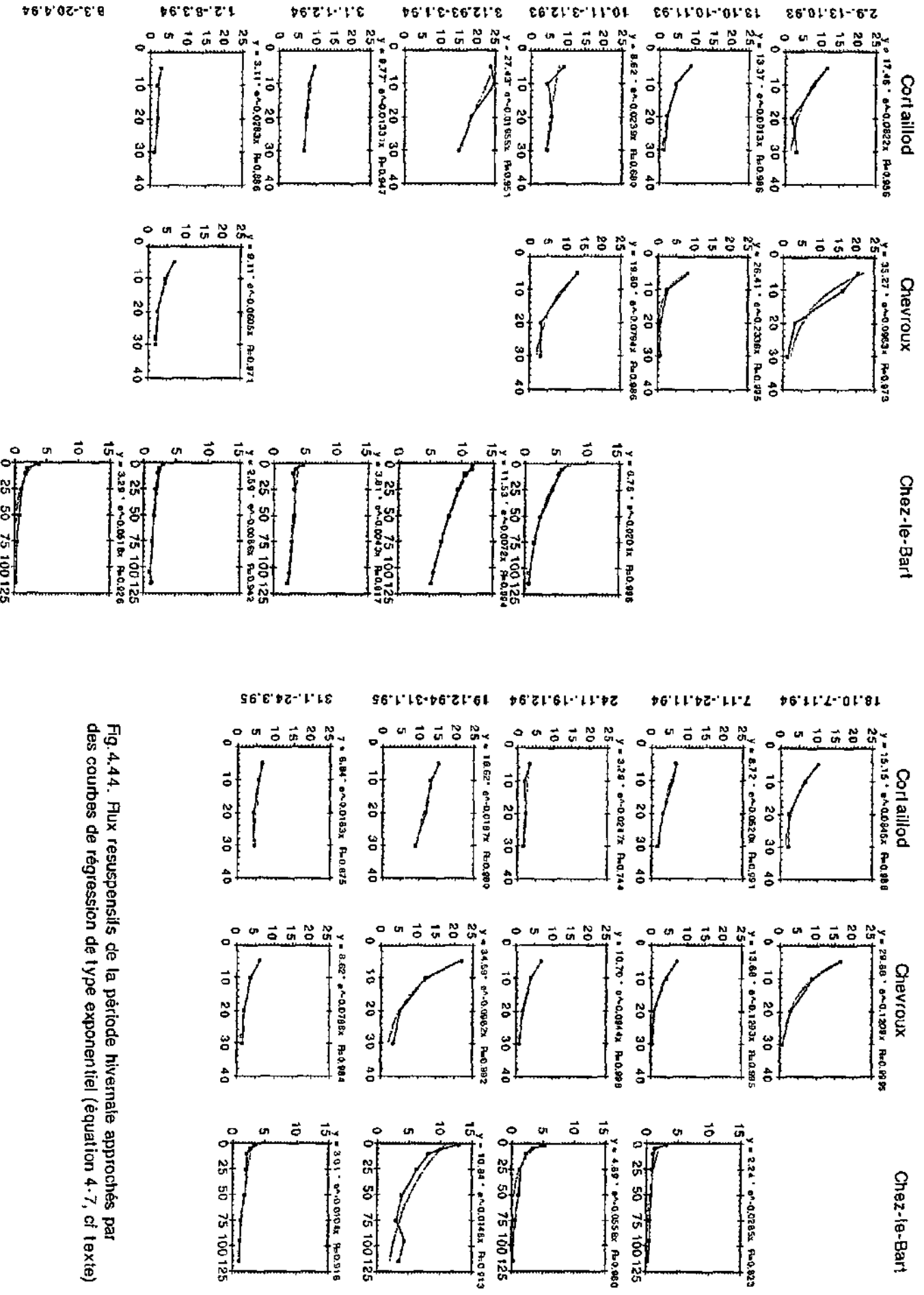


Fig.4.44. Flux resuspensils de la période hivernale approchés par des courbes de régression de type exponentiel (équation 4-7, cf texte)

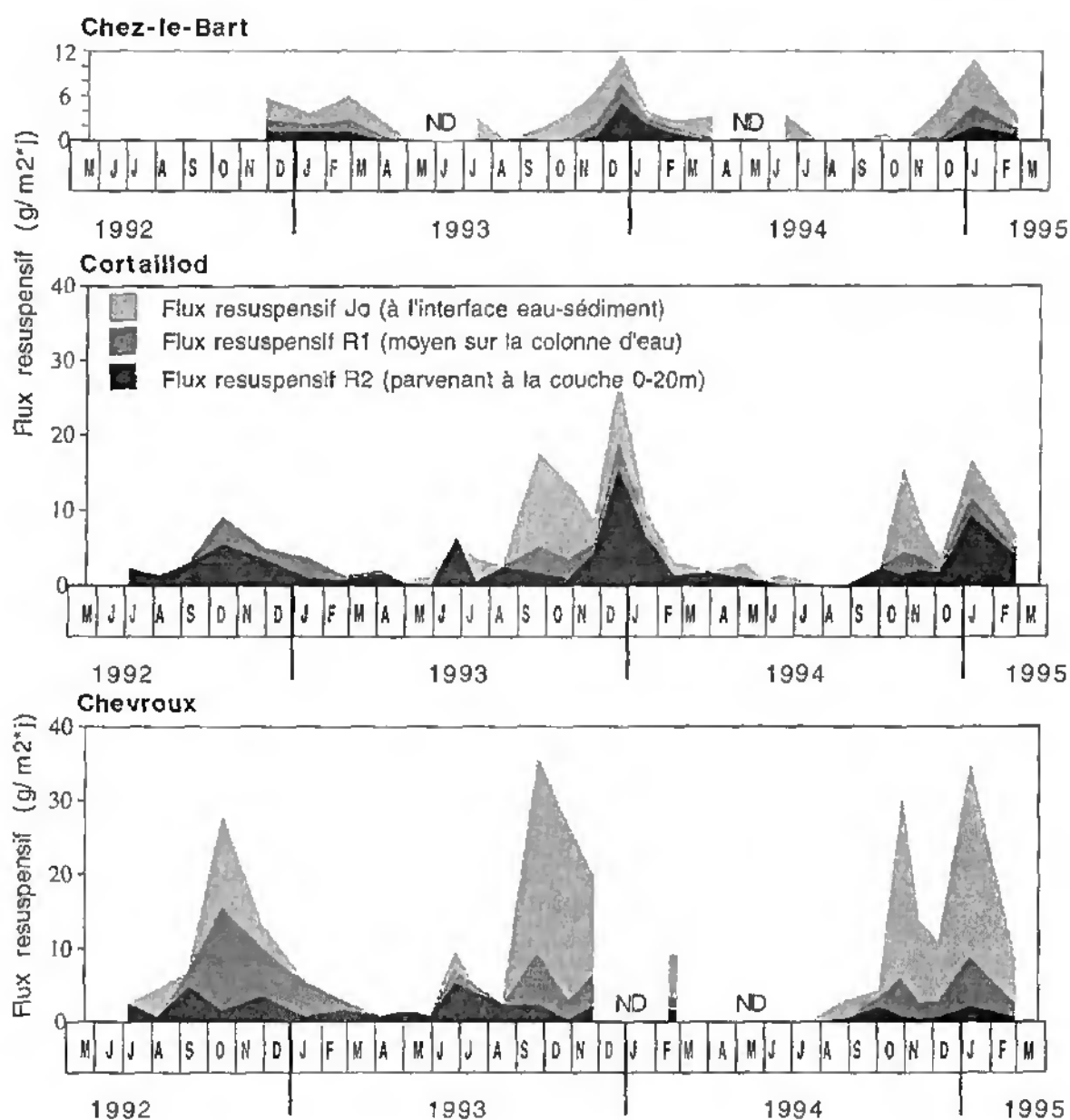
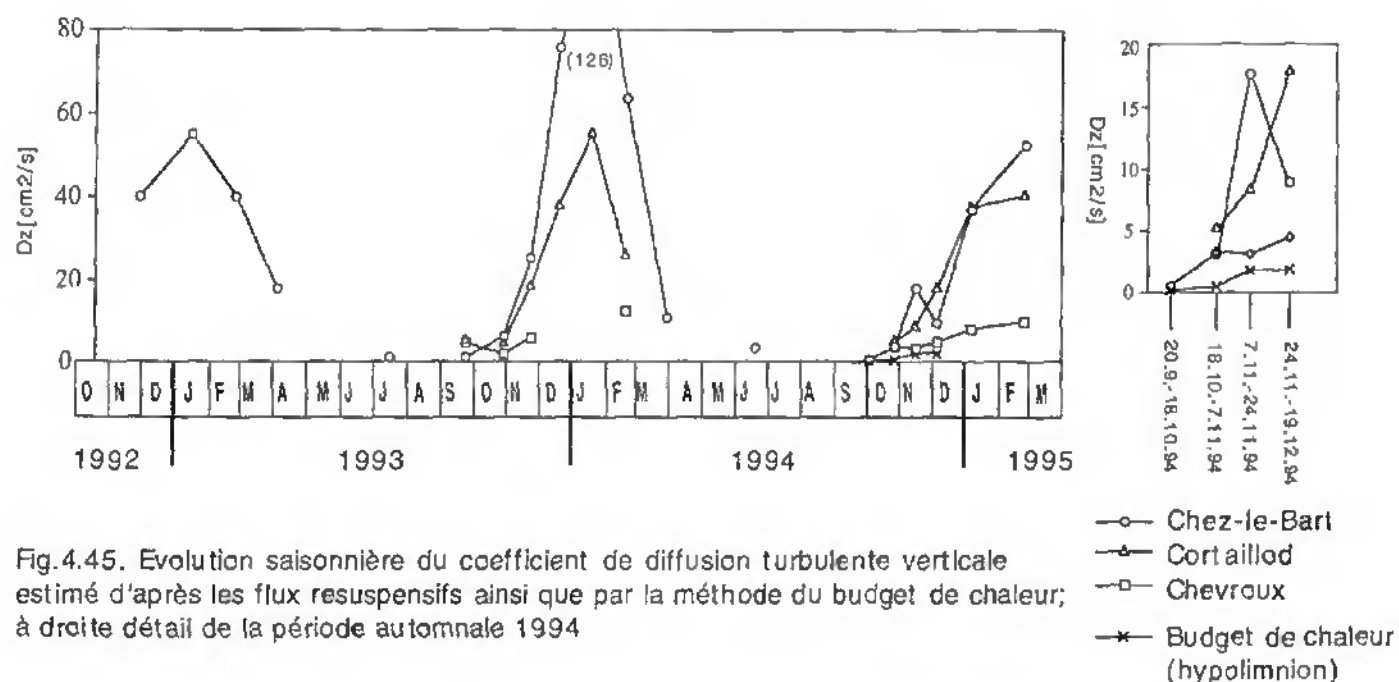


Fig. 4.46. Flux resuspendus Jo, R1 et R2 pour les trois stations de pièges à sédiments; notez les faibles flux R1 et R2 de la station de Chevroix par rapport à Cortailod

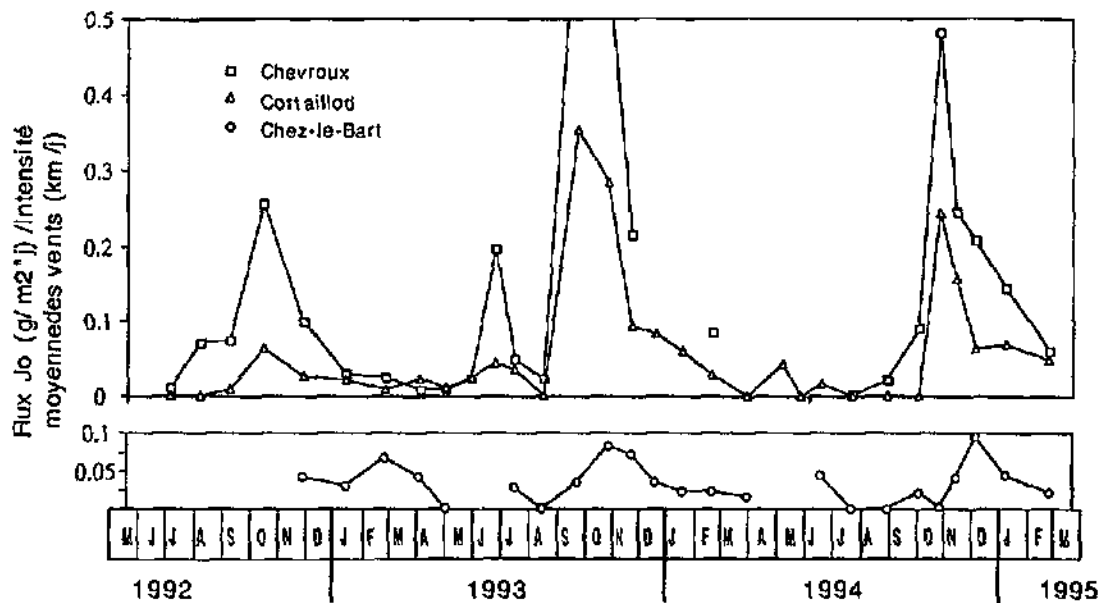


Fig.4.47. Evolution du rapport entre le flux resuspendu à l'interface eau-sédiment (J_o) et la moyenne de l'intensité des vents

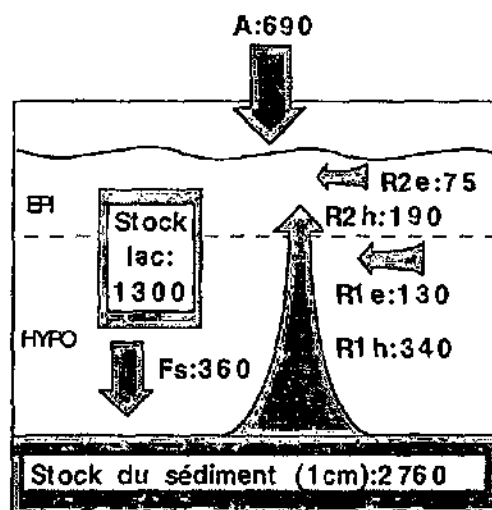


Fig.4.48. Schéma du bilan du phosphore; les flux et les stocks s'expriment en $[mg\ P/m^2]$; A: apports au lac; Fs: Flux sédimentaire annuel; R1 correspond à la moyenne sur toute la colonne d'eau du flux resuspendu de phosphore de la zone profonde et des lombants; R2: idem pour la couche épilimnique (0-20m); e: été (flux essentiellement latéral); h: hiver (flux essentiellement vertical)

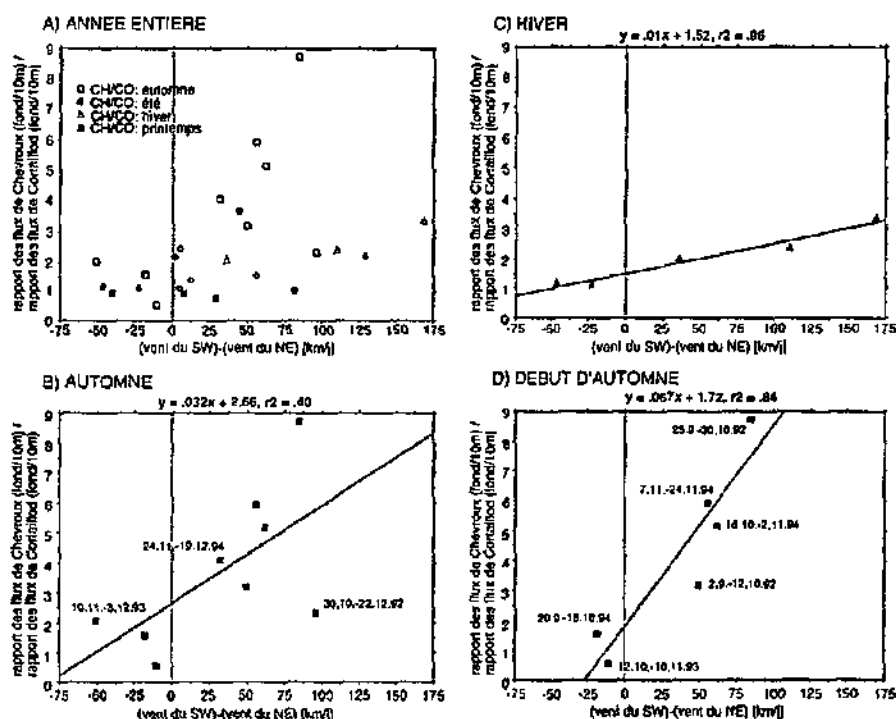


Fig.4.49. Comparaison entre la différence d'évolution des flux avec la profondeur à Chevroux et à Cortaillod et le régime de vents prédominants; en ordonnée: quotient du rapport des flux ($lond/10m$) de Chevroux et de Cortaillod; en abscisse: moyenne journalière de la différence entre les vents du NE ($>2m/s$) et les vents du SW ($>2m/s$)

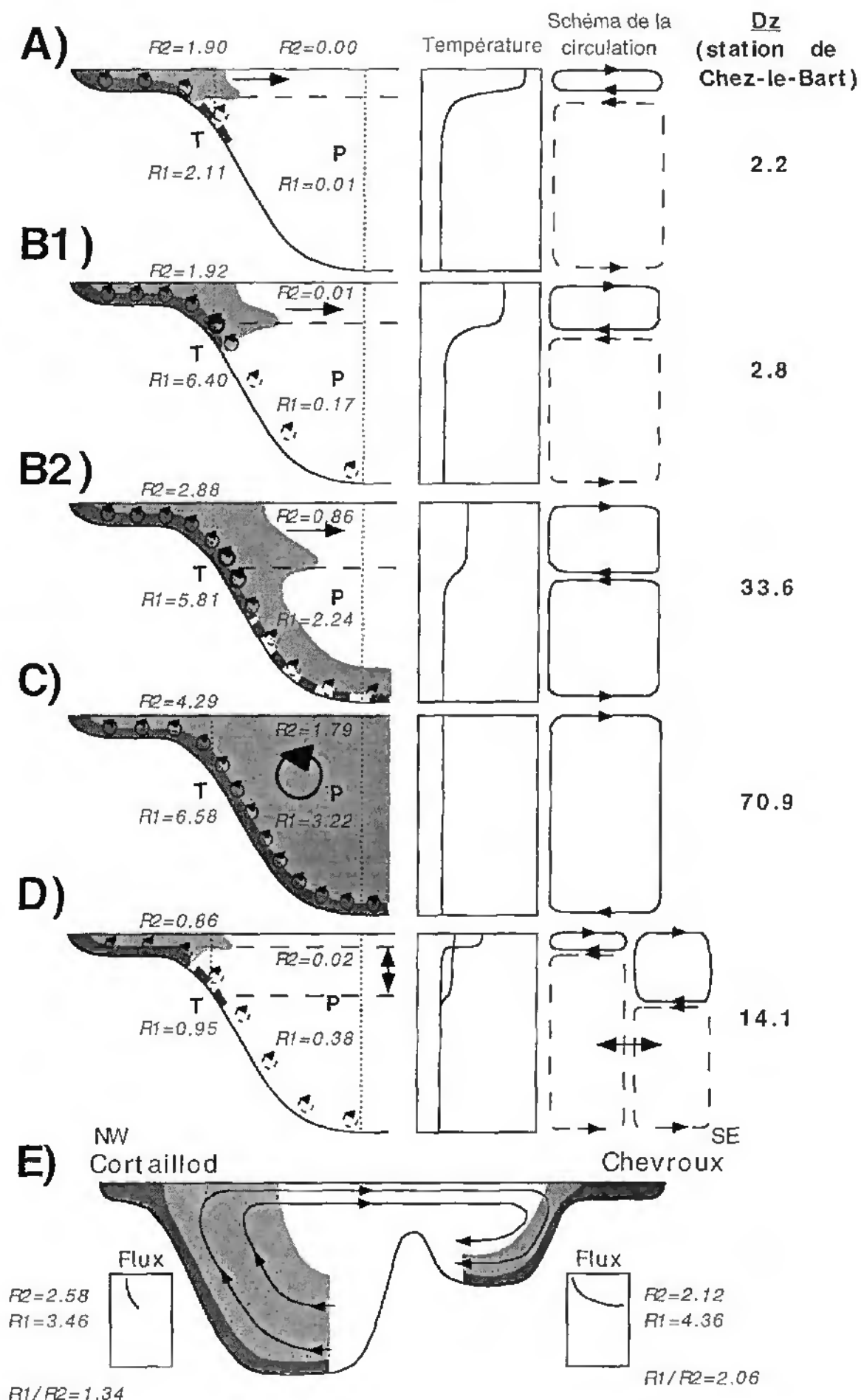


Fig.4.50. Modèle schématique de la resuspension; A) Eté; B1) Début d'automne; B2) Fin d'automne; C) Hiver; D) Printemps; E) Schéma général de circulation probable; T: tombants; P: plaine (Chez-le-Bart); R1,R2: flux resuspendifs; Dz: coefficient de diffusion turbulente verticale; les circulations exprimées en lignes traitillées expriment la probable existence de courants hypolimniques relativement faibles

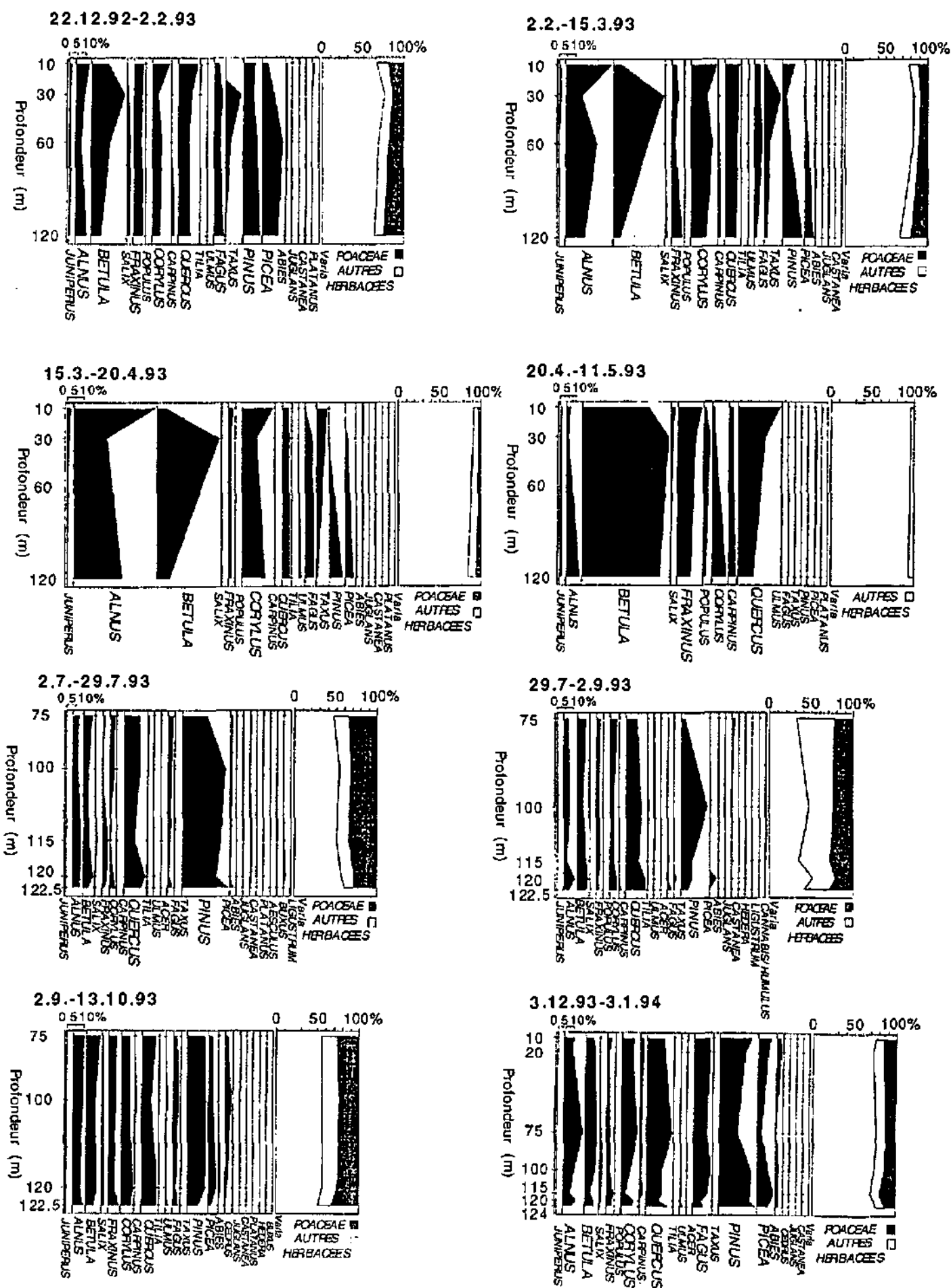


Fig.4.51. Diagrammes polliniques de la saison 1993 à la station de Chez-le-Bart

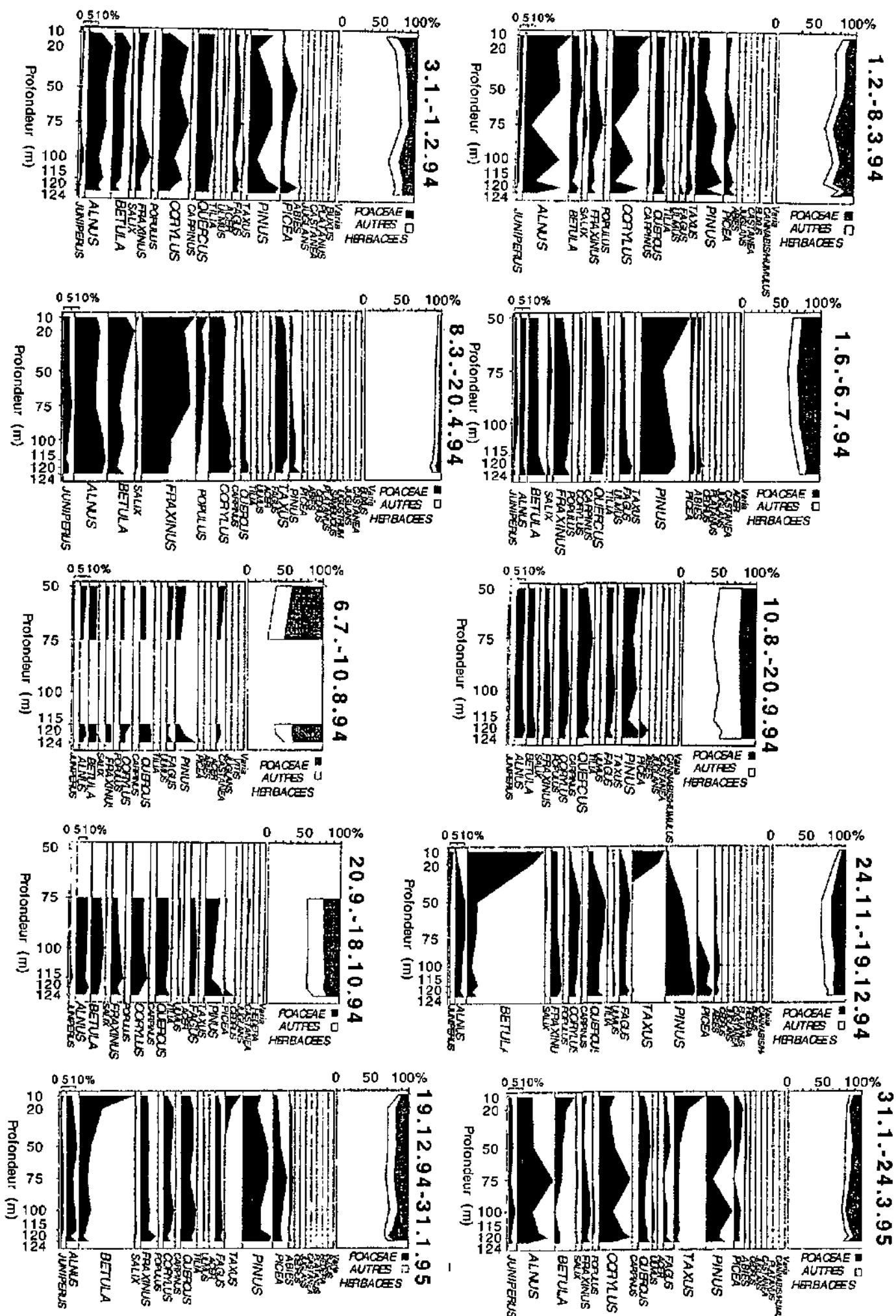
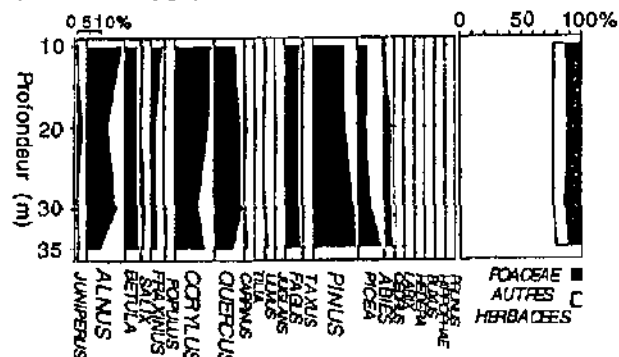
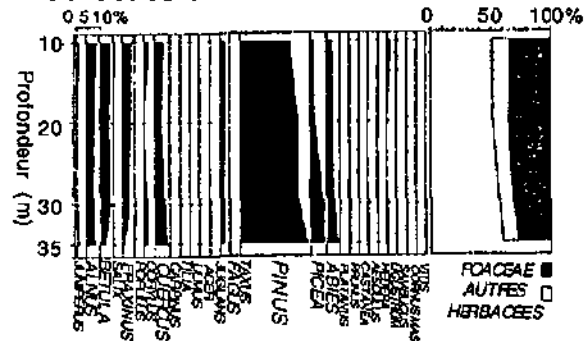


Fig.4.52. Diagrammes polliniques de la saison 1994 à la station de Chez-le-Bart

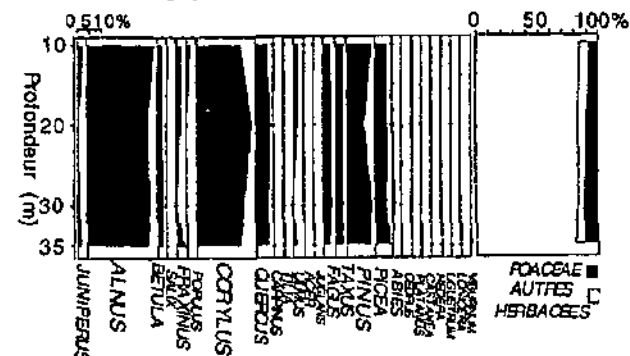
3.1.-1.2.94



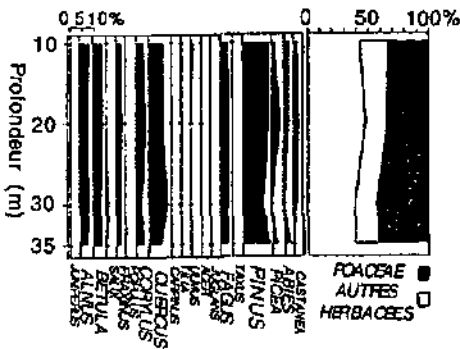
1.6.-6.7.94



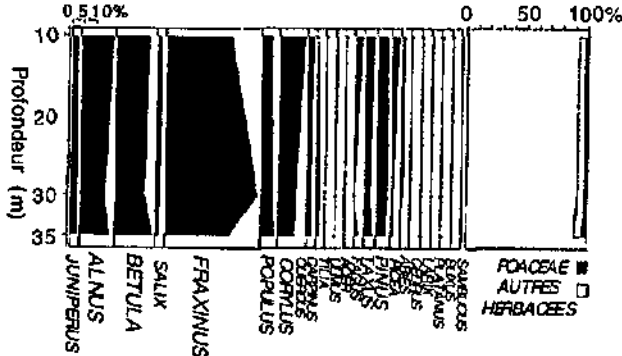
1.2.-8.3.94



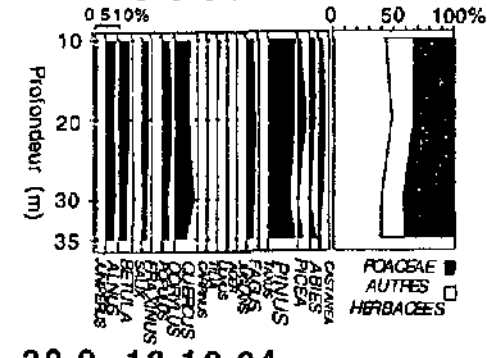
6.7.-10.8.94



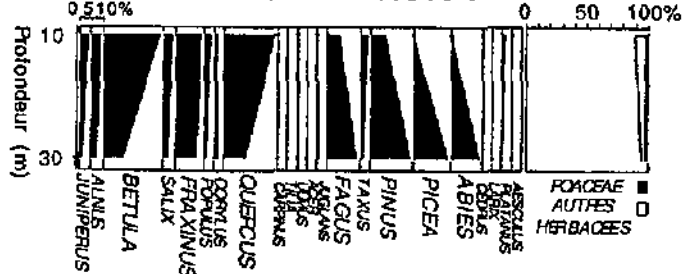
8.3.-20.4.94



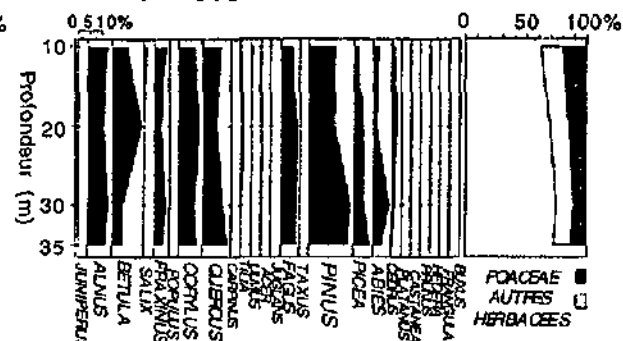
10.8.-20.9.94



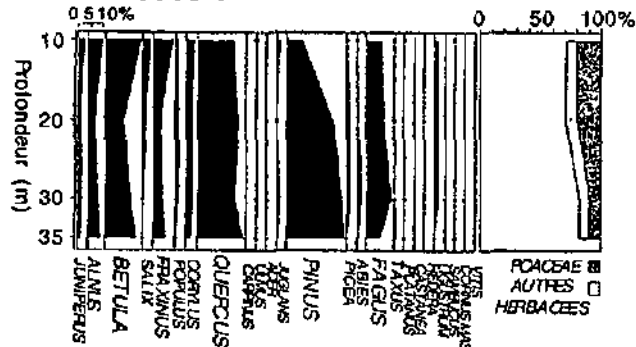
20.4.-24.5.94



20.9.-18.10.94



24.5.-1.6.94



7.11.-24.11.94

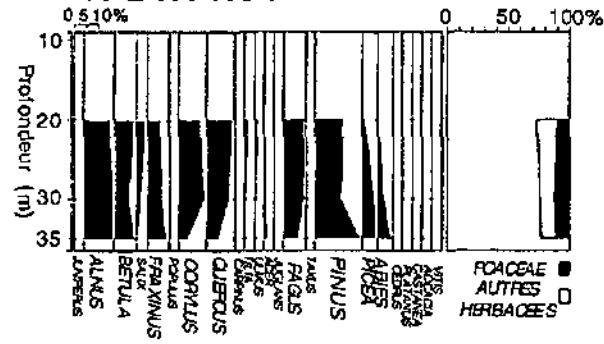


Fig.4.53. Diagrammes polliniques de la saison 1994 à la station de Cortaillod

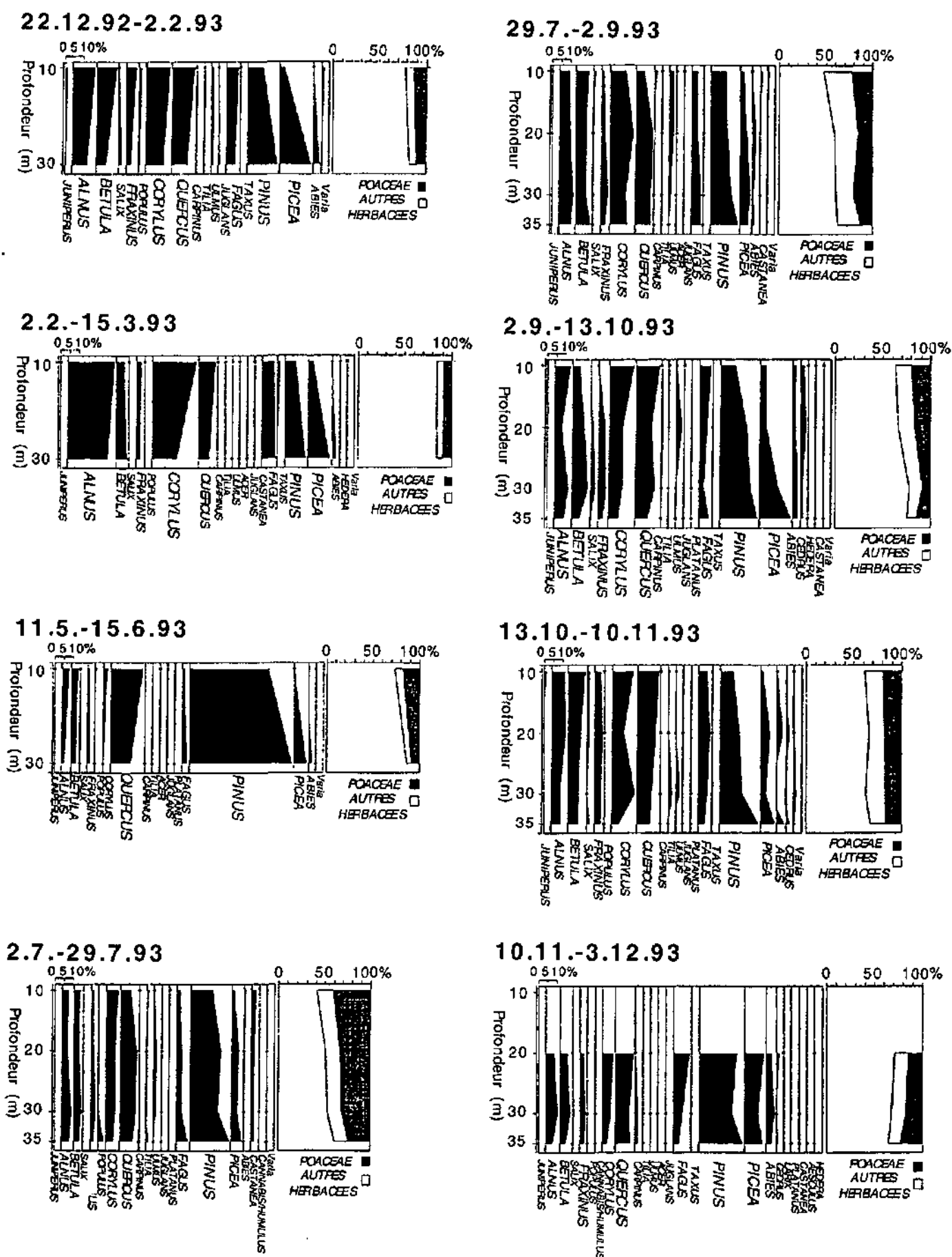


Fig.4.54. Diagrammes polliniques de la saison 1993 à la station de Chevroix

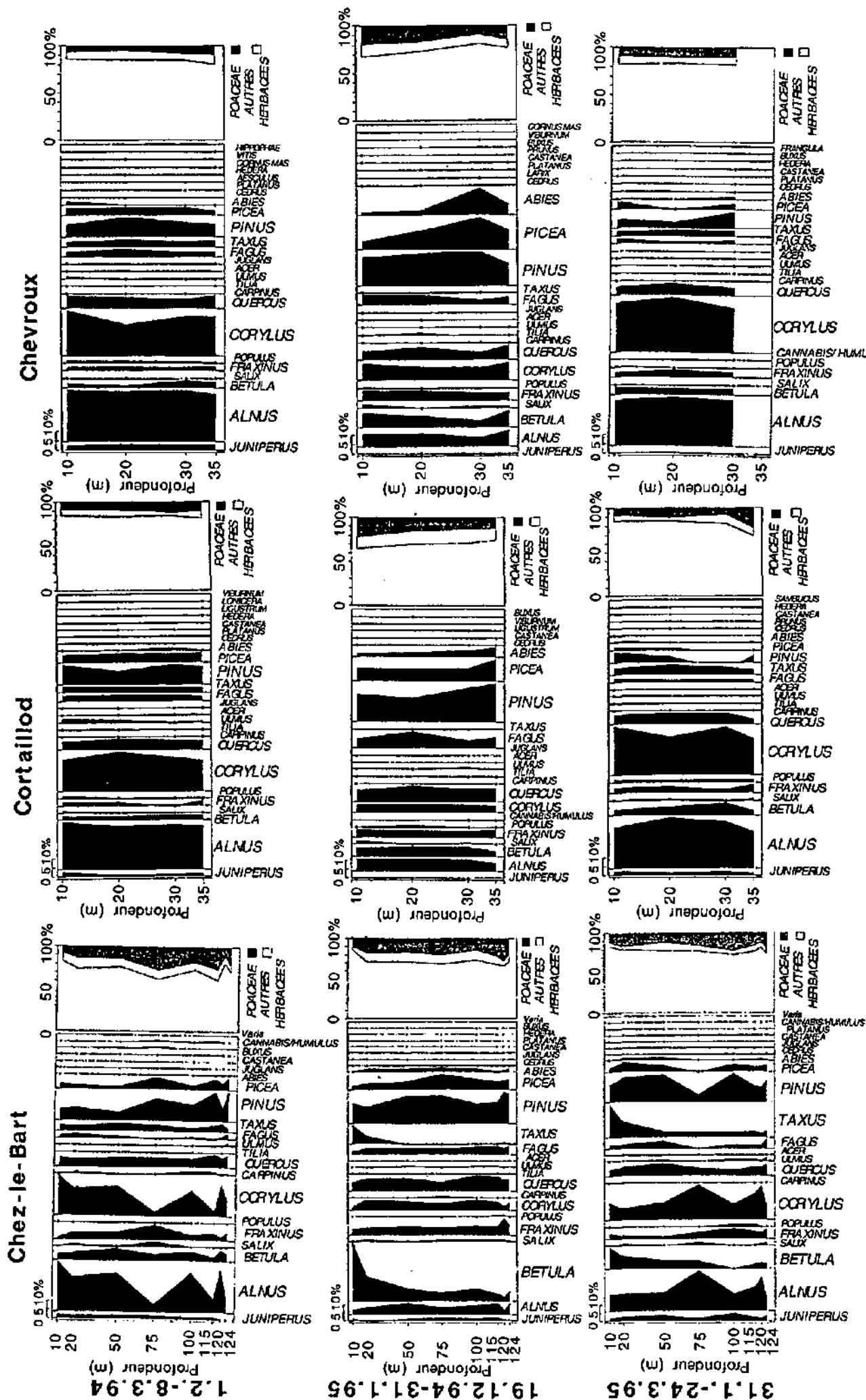


Fig. 4.55. Comparaison des diagrammes polliniques des stations de Chez-le-Bart, Cortailod et Chevroux lors de trois périodes hivernales

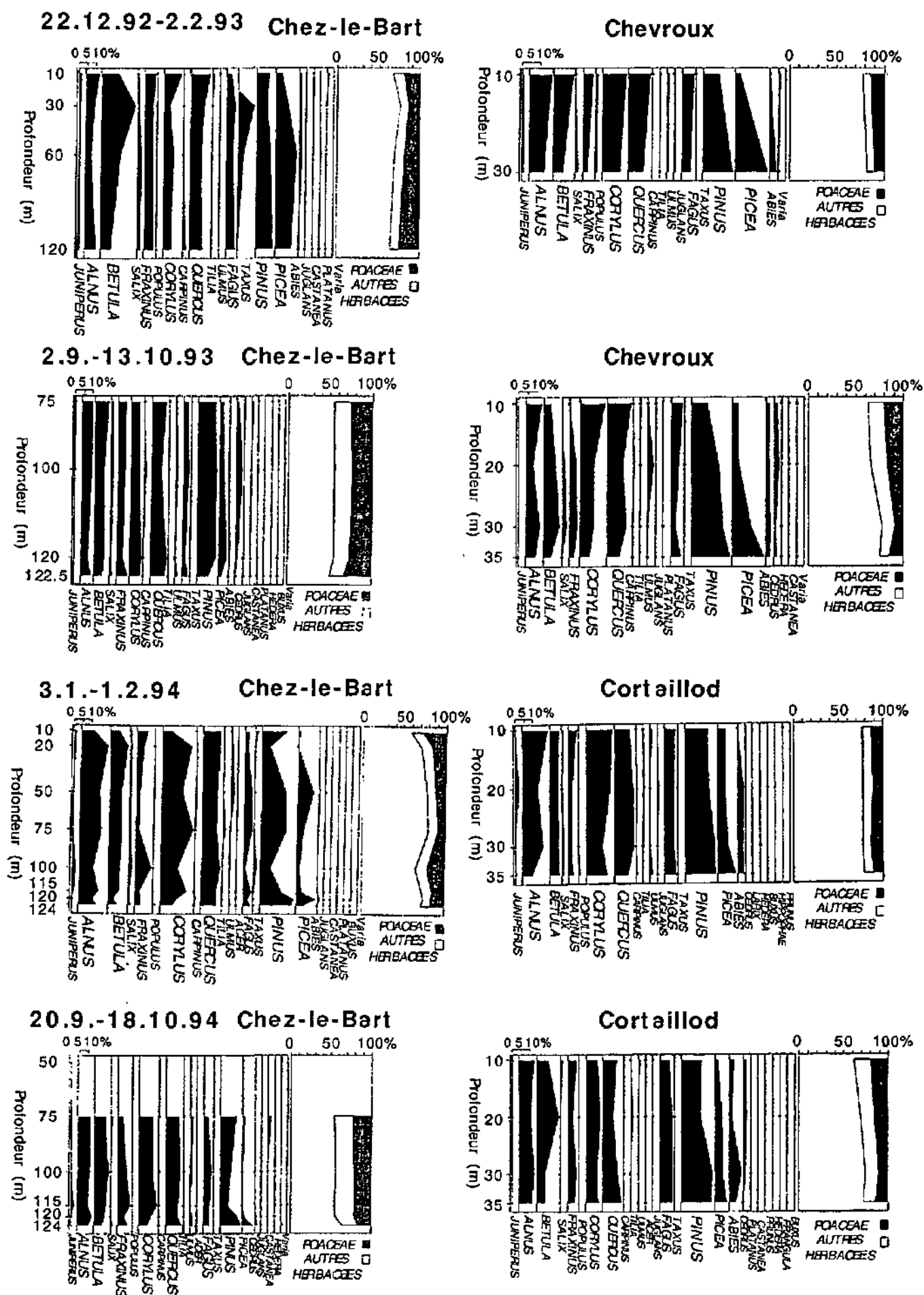


Fig.4.56. Comparaison des diagrammes polliniques des stations de Chez-le-Bart et de Chevroux d'une part, des stations de Chez-le-Bart et de Cortailod d'autre part, lors de périodes automnales et hivernales

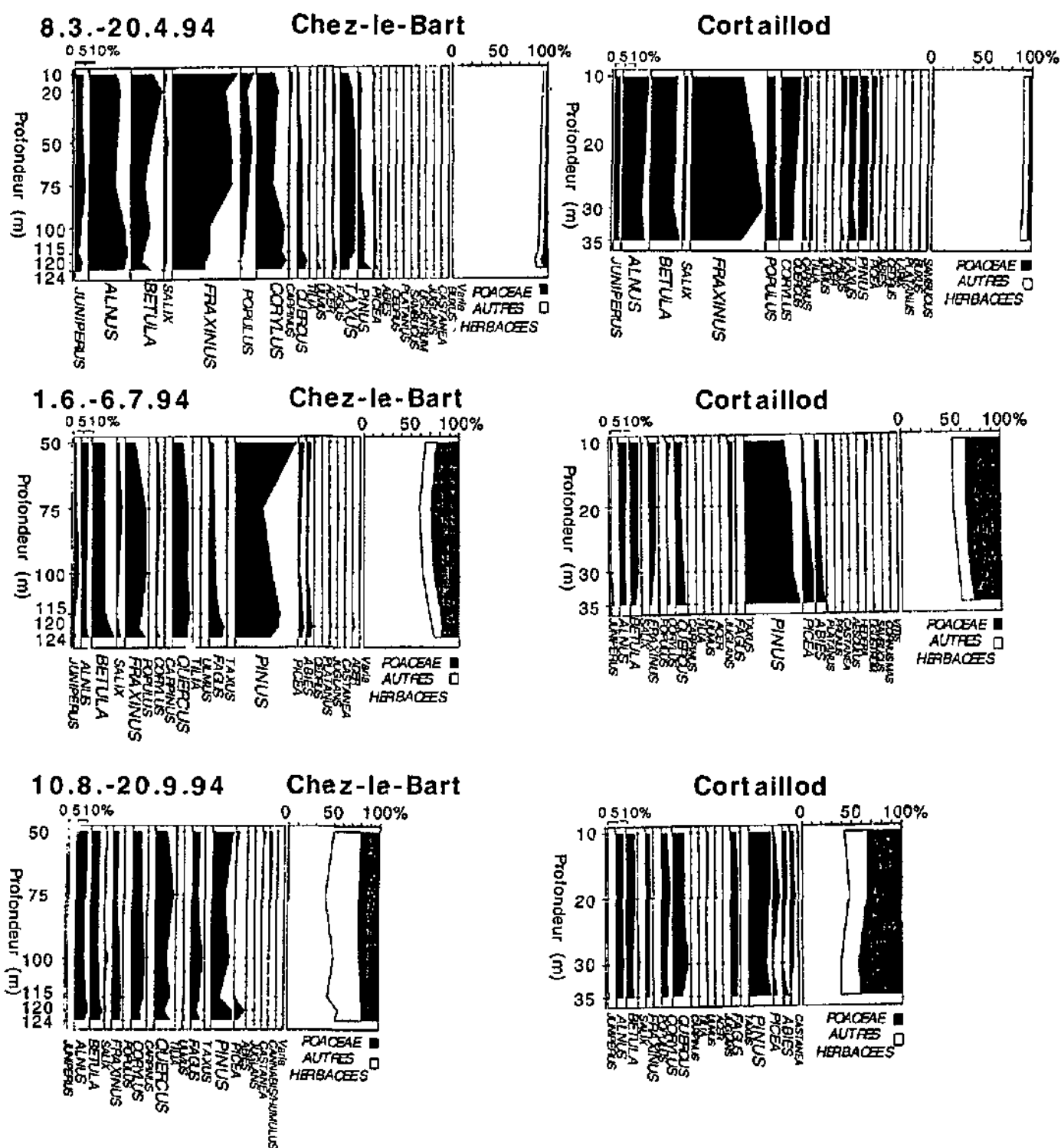


Fig.4.57. Comparaison des diagrammes polliniques des stations de Chez-le-Bart et de Cortailod lors de périodes printanières et estivales

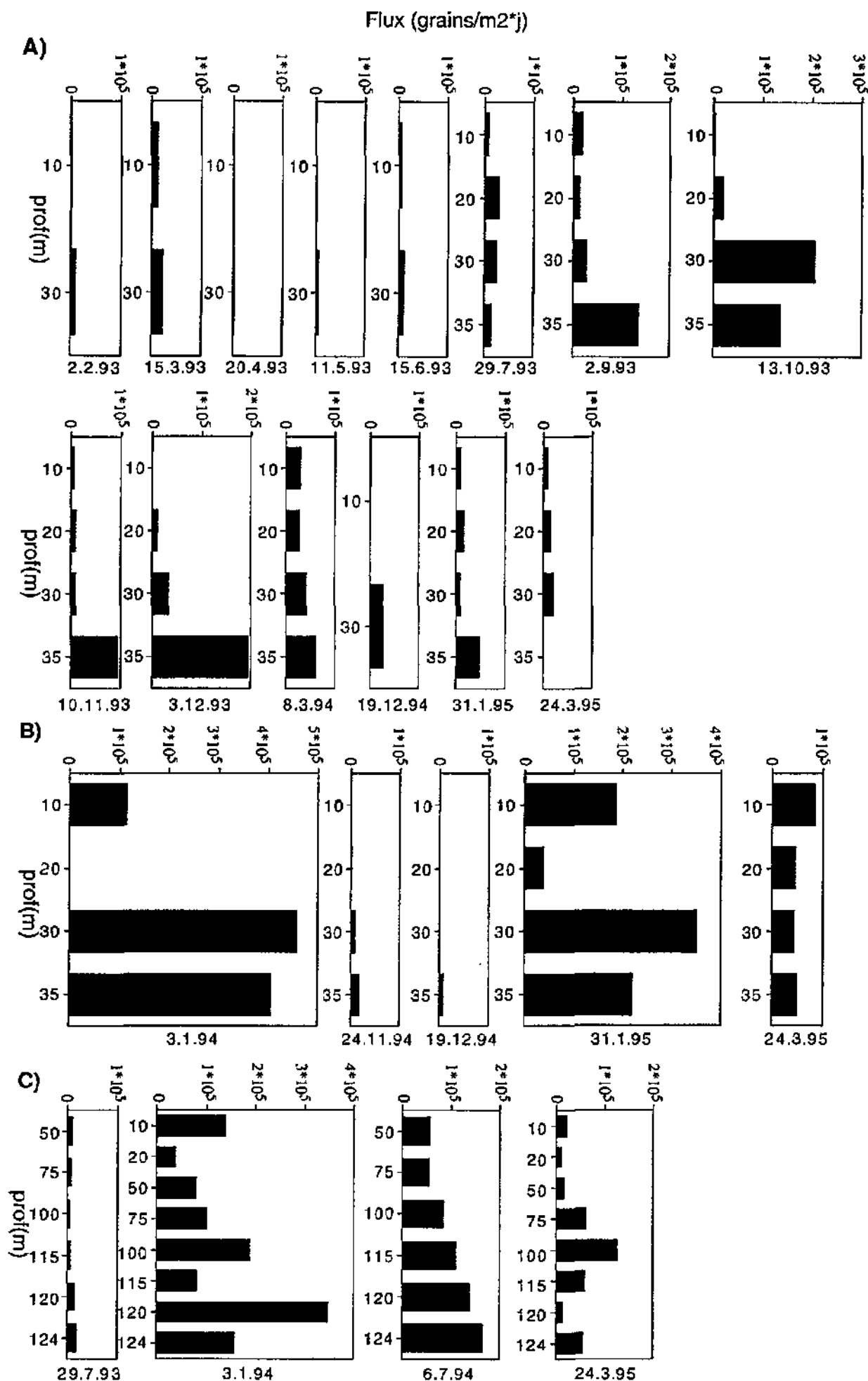
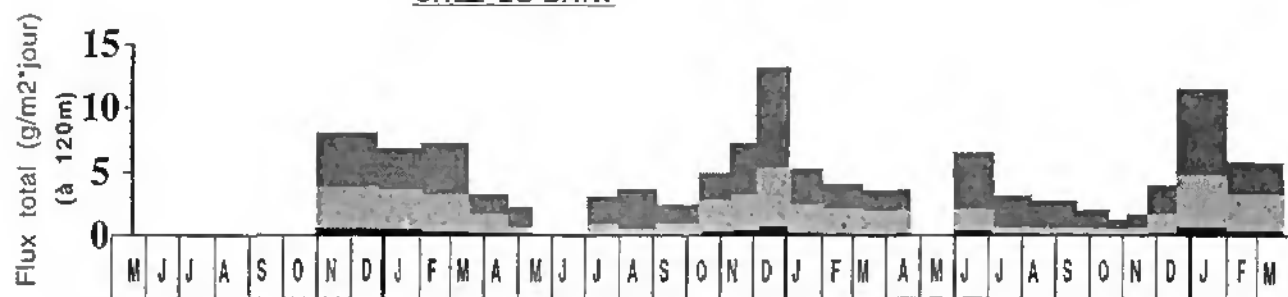
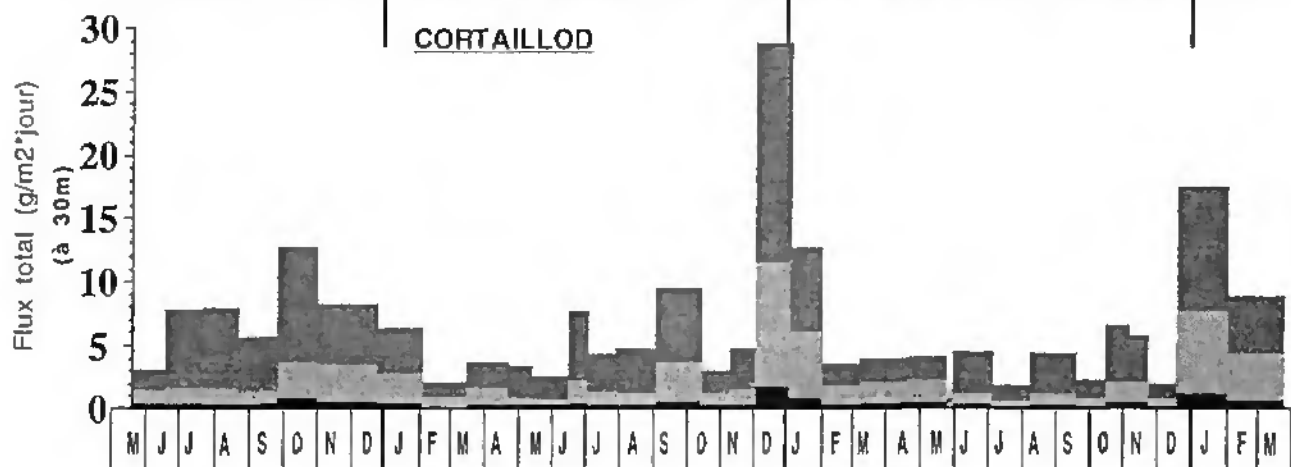


Fig.4.58. Flux de grains de pollens; A) Chevroix; B) Cortailod; C) Chez-la-Bart

CHEZ-LE-BART



CORTAILLOD



CHEVROUX

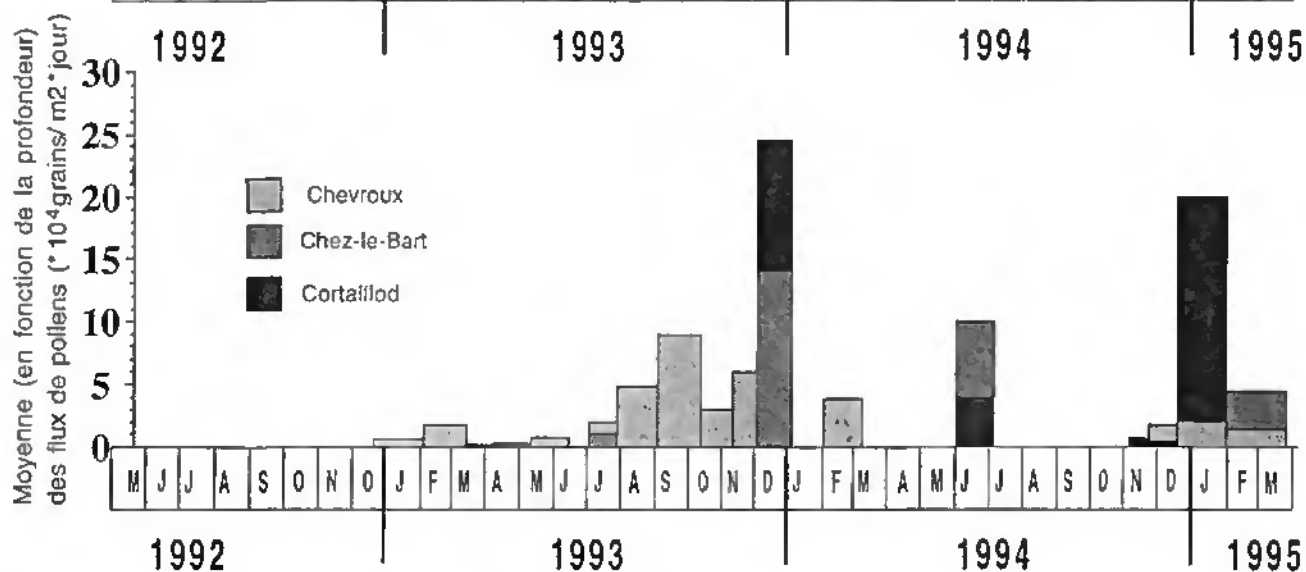
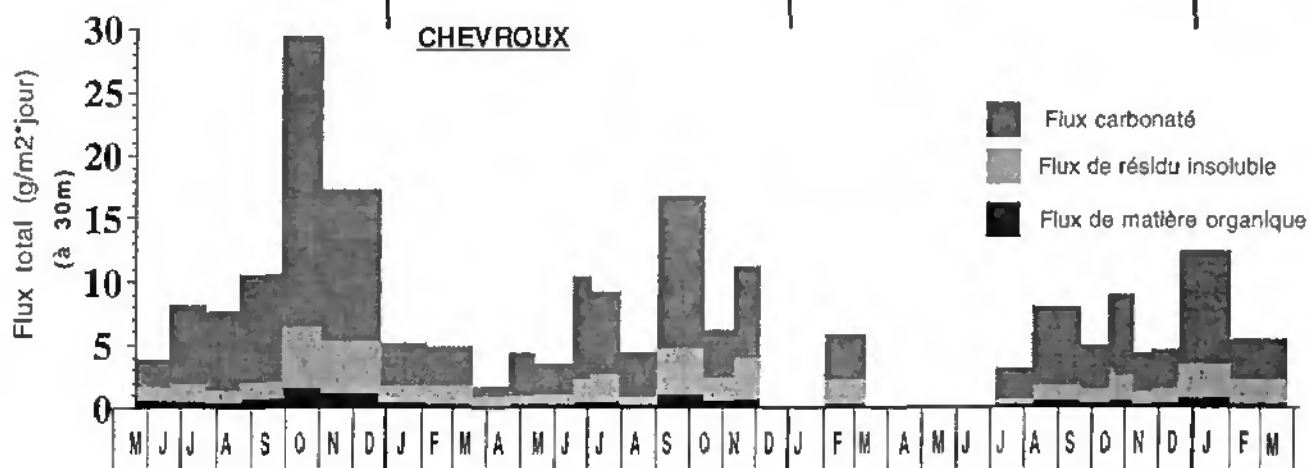


Fig.4.59. Comparaison des flux sédimentaires totaux et des flux de pollens pour les trois stations de pièges

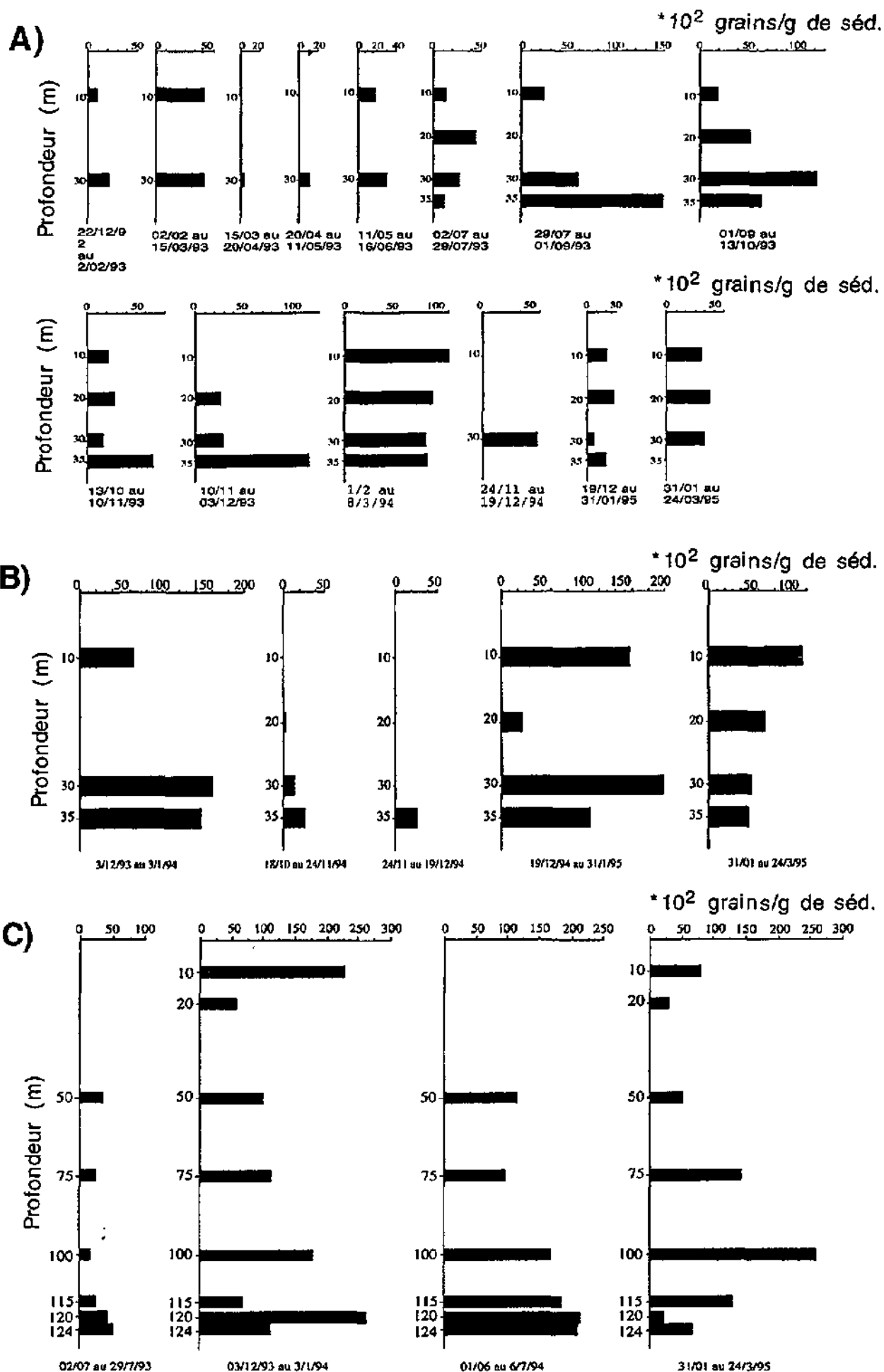


Fig.4.60. Concentrations absolues du matériel en grains de pollens;
A) Chevroux; B) Cortailod; C) Chez-le-Bart

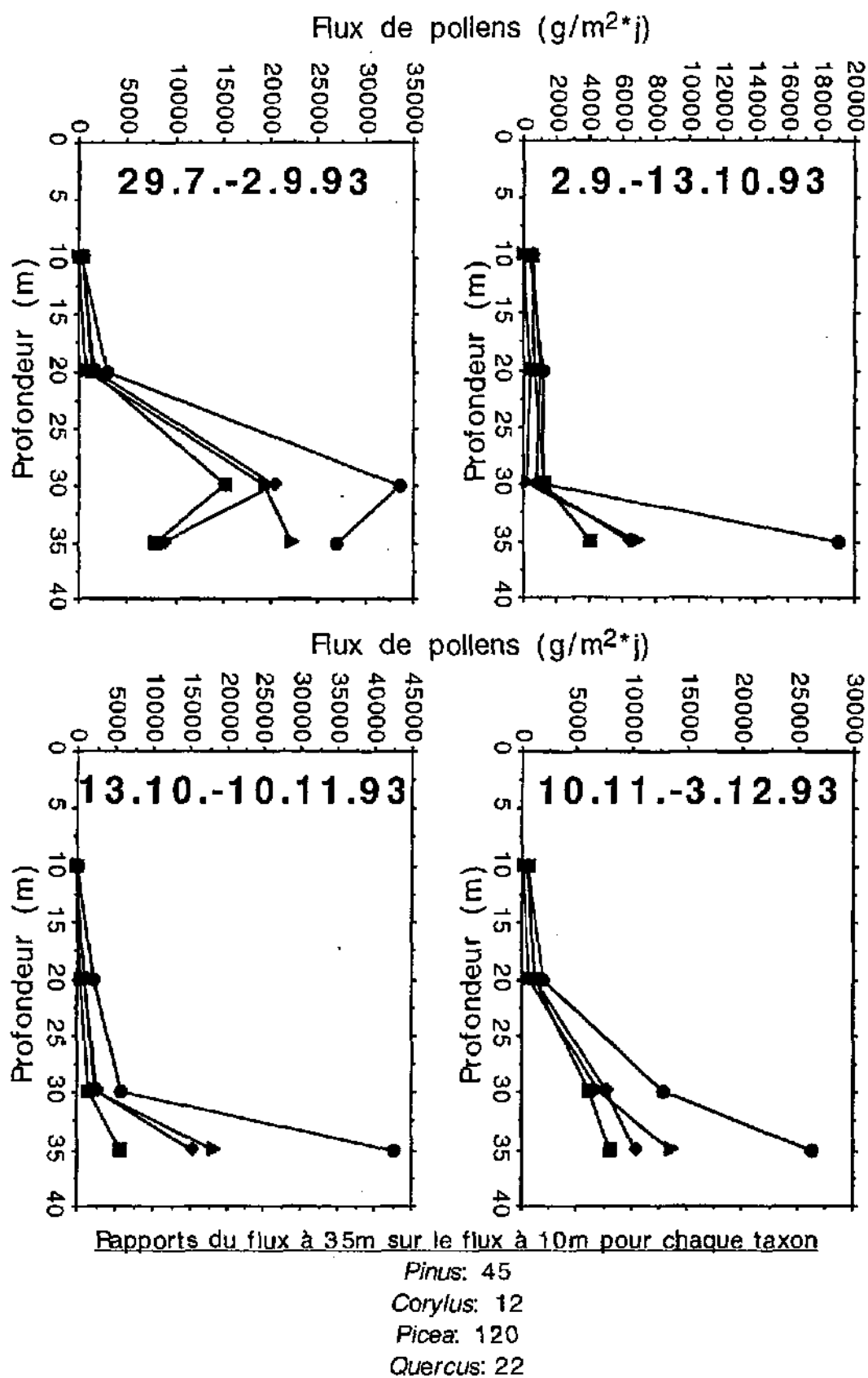


Fig.4.61. Flux de pollens de différents taxons durant la période automnale 1993 à Chevroux; ronds: *Pinus*; carrés: *Corylus*; triangles: *Picea*; losanges: *Quercus*

CHAPITRE 5

Reconstitution de l'évolution des conditions environnementales de 1500BP à nos jours

5.1. Introduction

Cette étude de la sédimentation tardi-Holocène vise à reconstituer les modifications qu'a subi l'écosystème lacustre en relation avec son bassin versant, ainsi que d'appréhender leurs causes, anthropogéniques, climatiques ou autres.

L'analyse pollinique des sédiments devrait permettre d'avoir une idée de l'état de la couverture végétale, ainsi que de déterminer les causes des modifications intervenues à ce niveau. L'analyse des assemblages d'ostracodes et de diatomées est susceptible de nous fournir des informations sur le niveau trophique des eaux du lac, alors que l'évolution du rapport $\delta^{13}\text{C}$ des ostracodes benthiques et des carbonates totaux est généralement interprétable en termes de paléoproduktivité ou de composition du carbone inorganique dissous (DIC) des apports.

L'analyse de la composition générale du matériel et la reconstitution des taux d'accumulation peut permettre d'avoir une idée de l'évolution de la précipitation carbonatée ainsi que de l'érosion des sols.

Enfin, les analyses des isotopes stables de l'oxygène des carbonates totaux et des valves d'ostracodes sont complémentaires et sont susceptibles de nous donner des indications sur l'évolution paléohydrologique du lac, sur l'évolution passée de la température de l'air ainsi que sur la différence entre températures hypolimnique et épilimnique de l'eau.

En outre, une étude de la dispersion des apports de talc et de kaolinite d'origine industrielle a été entreprise en vue de vérifier l'hypothèse de l'existence de sites privilégiés de sédimentation dans le lac de Neuchâtel.

5.2. Description lithologique

27 carottes courtes ont été prélevées. Le carottier de type Kullenberg utilisé est décrit par Kelts et al. (1986). La Figure 5.1. présente la localisation des prélèvements.

Le sédiment est constitué de limons argileux carbonatés, d'une couleur gris-jaune clair, devenant gris-noire à proximité de la surface. La structure est généralement homogène, des laminations diffuses étant toutefois parfois visibles. Sur la base des variations de couleur, cinq intervalles lithologiques ont été distingués. Ils sont présentés aux Figures 5.2. et 5.3.

Des variations spatiales de lithologie existent; dans le Haut-lac, le sédiment est de couleur plus foncée ce qui traduit une composition plus argileuse due aux apports détritiques de la Mentue et de la Thielle principalement. Deux zones de sédimentation turbiditique ont été reconnues, la première au large de l'Areuse (C10) et la seconde dans la région au large de Cudrefin (C4, C5)(Fig.5.3.). Le sédiment prélevé sur la berge lacustre est généralement de couleur claire, et a une composition très carbonatée. Sa structure est constituée d'alternances de niveaux millimétriques fins et grossiers, avec présence de nombreuses coquilles de gastéropodes.

5.3. Corrélations entre les différentes carottes courtes

Les résultats des corrélations lithologiques entre les différentes carottes courtes sont présentés à la Figure 5.4. On remarque une dépendance du taux de sédimentation vis à vis de la profondeur d'eau avec des taux d'accumulation généralement moins élevés dans le bassin SE que dans les bassins NW et de Neuchâtel. A noter que le taux de sédimentation sur la dorsale de "la Motte" et sur le tombant SE est parfois tellement faible (C14, C18, C24), qu'il est difficile de différencier la limite L5-L4 de la limite L4-L3.

Nous avons tenté de vérifier et de préciser ces corrélations. Une méthode utilisée comme moyen de corrélation des sédiments lacustres est celle de la susceptibilité magnétique volumique (SMV)(Thompson et al., 1975). Elle est valable tant que les minéraux magnétiques responsables de la SMV sont d'origine allochtone et que leurs apports sont suffisants pour que des variations sensibles puissent être détectées. Une anoxie marquée peut en effet être à l'origine de la formation de minéraux magnétiques (magnétite, greigite) lors de la diagenèse précoce du sédiment (Hilton and Lishman, 1985; Hilton et al., 1986).

Les analyses ont été effectuées à l'Institut de géologie de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich (ETHZ). Les résultats sont présentés à la Figure 5.5. ainsi qu'à l'Annexe 5.1. Seule la transition entre les intervalles L4 et L3 est reconnaissable par un maximum dans la SMV, les valeurs diminuant ensuite régulièrement en

direction de la surface. Cette mesure peut donc être considérée comme grossièrement représentative du rapport entre apports allochtones et production de calcite endogénique, sans qu'une corrélation fine entre les carottes soit possible. Ce résultat est relativement logique étant donné que le lac de Neuchâtel ne compte pas d'affluents au débit très important. D'autre part, la proportion de minéraux magnétiques dans la matière en suspension transportée par les affluents est probablement faible, aucun minéral magnétique n'y ayant été détecté.

Une autre méthode de corrélation qui a été adoptée est celle du carbone total. Le contenu en carbone total n'est pas en tant que tel un paramètre conservatif dans la mesure où il comprend un terme inorganique et un terme organique et que les carbonates peuvent être sujets à des modifications au cours de la diagenèse. Il peut toutefois être considéré comme représentatif du contenu en carbone inorganique dans les intervalles L3 à L5, étant donné la faible variation de la teneur en carbone organique (0.8-1.2%; Fig.5.6.B). Le principe de la méthode est présenté à la Figure 5.6. Après avoir obtenu un profil continu de la teneur en carbone total (échantillonnage en continu tous les cm, tous les 2cm pour certaines carottes), des essais de normalisation d'échelle et de juxtaposition des courbes sont tentés jusqu'à ce qu'un bon accord entre elles soit trouvé. Les variations principales dans l'allure des courbes - points d'inflexion, maxima ou minima - peuvent ensuite être définis en tant que niveaux de corrélation. Les résultats sont présentés à la Figure 5.7. On observe une bonne correspondance entre les corrélations établies d'après cette méthode et celles établies d'après la lithologie (Fig.5.7.A).

Une troisième méthode a consisté à corréler les maxima du rapport entre les intensités brutes du talc et de la somme des phyllosilicates (pics d'intensité maximale) dans la fraction 2-16 μ m. Ce maxima est systématiquement situé à la base de l'intervalle L1 et une bonne correspondance avec les résultats des autres méthodes de corrélation est obtenue (Fig.5.7.).

5.4. Chronostratigraphie

Les résultats des datations AMS-C14 sont présentés à la Figure 5.8. ainsi qu'à l'Annexe 5.2. Deux datations ont été effectuées sur des macrorestes terrestres de la carotte C19. La première à la transition entre les intervalles L4 et L3 donne 1242 $\pm$ 61AD (âge non calibré: 755 $\pm$ 65BP), la seconde quelques centimètres au-dessus 1298 $\pm$ 47AD (âge non calibré: 705 $\pm$ 55BP). Une autre datation effectuée sur des macrorestes de la carotte LN04, reprise de la thèse d'Antje Schwalb (1992), donne 805 $\pm$ 68AD (1215 $\pm$ 55 BP) et se place dans la partie inférieure de l'intervalle L4. Le cadre chronologique de ces datations est en bon accord avec les biochronozones établies par Philippe Hadorn sur la carotte LN01 (Fig.5.8.; données non publiées). Un essai de datation AMS-C14 sur des valves d'ostracodes et de lamellibranches (*Pisidium conventus*) a été tenté sur la carotte C19e au sommet de l'intervalle L5. L'âge obtenu (876 $\pm$ 49BC) n'est pas compatible ni avec la palynostratigraphie ni avec les autres datations AMS-C14. L'incorporation de carbone issu des carbonates du bassin versant dans les coquilles de ces organismes (Fritz, 1984) pourrait expliquer cette datation. Il est en effet connu que cet effet peut mener à un vieillissement artificiel de l'ordre de 1000 à 2000 ans de la datation obtenue (Andree et al., 1986).

Le cadre chronologique des carottes courtes peut être résumé de la manière suivante: la transition entre les intervalles L5 et L4 se situe au sein de la période du Haut Moyen Age (476-700AD); celle entre L4 et L3 au Moyen Age aux alentours du 13^e siècle. La transition L2-L1 est légèrement antérieure au maxima des apports de talc, maxima qui a été daté 1952 $\pm$ 4ans (Fig.5.). Elle peut donc être grossièrement estimée comme ayant eu lieu entre 1920 et 1950, alors que la transition L3-L2, en postulant un taux de sédimentation constant entre la base de L3 et le sommet de L2 se situe aux alentours de 1800AD.

5.5. Texture, taille de la calcite endogénique

La texture du sédiment étudiée au microscope électronique à balayage (MEB) est présentée aux Figures 5.9. et 5.10. Les intervalles L3 à L5 sont caractérisés par la présence d'agrégats de calcites de petite taille accompagnés de minéraux détritiques (Fig.5.9.A-D). La base de l'intervalle L3 est marquée par une proportion nettement plus élevée de minéraux détritiques (Fig.5.9.C). Aucune frustule de diatomée n'a été observée dans ces niveaux. L'intervalle L2 se différencie des niveaux inférieurs par la plus grande abondance de calcites endogéniques de taille supérieure à 4 μ m (Fig.5.10.E) et pas la présence de rares frustules de diatomées. L'intervalle L1 est caractérisé par la présence de calcites endogéniques de taille comprise entre 8 et 16 μ m aux formes cristallines bien développées de faciès généralement rhomboédrique et par le grand nombre de frustules de diatomées (Fig.5.9.E-F, Fig.5.10.F).

Le faciès et la taille des calcites endogéniques semble donc avoir varié au cours du temps. Dans les intervalles L3 à L5, les calcites sont formées de polyèdres mal cristallisés de taille généralement inférieure à 4 μ m (Fig.5.10.A-D). Des formes montrant des traces de dissolution (Fig.5.10.B et D) coexistent avec d'autres qui en sont exemptes (Fig.5.10.C). Les intervalles L2 et L1 voient l'apparition de rhomboèdres bien cristallisés qui coexistent avec des formes moins bien cristallisées (Fig.5.9.F. et 5.10.E), ce qui est en accord avec nos observations effectuées sur le matériel des pièges à sédiments (Fig.4.11.-4.12.). Il y a également coexistence dans ces deux niveaux de calcites empreintes et exemptes de traces de dissolution.

5.6. Granulométrie

La granulométrie de la carotte courte C19c est présentée à la Figure 5.11, ainsi qu'en Annexe 5.3.A. Le trait principal qui se dégage est la légère augmentation des tailles à l'approche de la surface, et ceci dès le sommet de l'intervalle L3, la plus forte variation ayant lieu à la transition entre les intervalles L2 et L1. La moyenne des tailles (mean) passe de 4.37µm dans les intervalles L5 à L3 à 4.52µm dans L2 et à 7.91µm dans l'intervalle L1. La variation observée peut être attribuée à l'augmentation de la taille moyenne des calcites et notamment à l'apparition de calcites endogéniques de taille comprise entre 8 et 16µm.

Discussion

La transition entre les intervalles L3 et L2 correspond au niveau des diatomées à l'apparition d'indicateurs d'eutrophie comme p.ex. *Stephanodiscus minutulus*, *Stephanodiscus neoastraea* ou encore *Aulacoseira islandica* subsp. *helvetica* (Fig.5.29.). La transition entre L2 et L1 se marque par l'accélération du processus d'eutrophisation avec apparition de taxons tels que *Stephanodiscus tenuis*, *Fragilaria crotonensis*, *Aulacoseira granulata* et *Cyclotella comensis*. Les teneurs en phosphore et carbone organique augmentent également en parallèle, et ce dès la base de l'intervalle L2 (Fig.5.14.). La modification des tailles moyennes des calcites peut donc être considérée comme contemporaine de l'augmentation de l'eutrophisation. Un tel phénomène a déjà été observé dans le Baldeggersee (Niessen and Sturm, 1987), où le mode principal des tailles des particules passe de 2-4µm avant le début de l'eutrophisation récente à 16-32µm dans les années 1970. Dans le lac de Neuchâtel, Schwalb (1992) mentionne déjà l'existence de l'augmentation des tailles des calcites à la proximité de la surface du sédiment. Nos analyses au microscope électronique à balayage (MEB) ont montré que la formation des calcites de grande taille est contemporaine des maxima saisonniers de la production phytoplanktonique (Fig.4.12.). Leur formation est donc probablement activée par une consommation du CO₂ menant à de fortes sursaturations et à une cristallisation rapide, la nucléation hétérogène étant par ailleurs probablement activée par le grand nombre de particules présentes. Ce résultat confirmerait ceux de Kunz (1983), qui a observé que la taille des calcites variait de manière linéaire en fonction de la sursaturation, pour autant qu'une nucléation hétérogène ait lieu.

D'autre part, la coexistence dans tous les niveaux de calcites comportant des traces de dissolution et de calcites qui en sont exemptes (cf. 5.5.) rend peu probable l'hypothèse d'une dissolution partielle au cours de la diagenèse. Comme l'étude du matériel des pièges permet de le postuler, il s'agirait plutôt d'une légère dissolution dans la colonne d'eau, une sous-saturation pouvant intervenir à la base de l'hypolimnion durant l'été (Fig.4.). Des conclusions similaires ont été tirées par Niessen and Sturm (1987) à propos du Baldeggersee et par Emerson (1976) et Weber (1981) concernant le Greifensee.

Comme le postulent Niessen and Sturm (1987), la taille des calcites endogéniques pourrait éventuellement être utilisée comme caractérisation du niveau d'eutrophisation atteint par le lac. Il est à cet égard intéressant de constater que la taille maximale des calcites du sédiment du lac de Neuchâtel n'atteint pas celle des calcites du Baldeggersee (30µm), ce qui est probablement à relier aux différents niveaux d'eutrophisation atteints par les deux lacs.

5.7. Minéralogie

La minéralogie du sédiment total de la carotte C19c est présentée à la Figure 5.12., où les profils obtenus pour cette colonne sédimentaire sont comparés avec ceux de la carotte C37. La calcite est dominante (50-90%) et est accompagnée de quartz, de phyllosilicates, de feldspaths et de carbonates détritiques, dolomite et ankérite. Le terme ankérite peut aussi bien s'appliquer à une ankérite stoechiométrique qu'à une ferrodolomite, l'analyse aux RX ne nous ayant pas permis de le déterminer. Les deux transitions L5-L4 et L4-L3 sont marquées par une diminution de 15 à 20% du contenu en calcite qui s'accompagne d'une augmentation de tous les minéraux détritiques. La teneur en calcite augmente ensuite relativement régulièrement de la base de l'intervalle L3 à l'intervalle L2 pour rediminuer légèrement à proximité de la surface. Une évolution similaire des profils s'observe en ce qui concerne les autres carottes courtes et en particulier C37. La comparaison entre les rapports (Ankérite+Dolomite/Ankérite+Dolomite+Calcite) ((A+D)/(A+D+C)) des principaux affluents et du sédiment (cf. paragraphe 4.4.6.) permet d'estimer une proportion de calcite allochtone oscillant entre 5 et 20%, et ceci de manière conforme à l'évolution générale des profils des autres minéraux détritiques.

La minéralogie des phyllosilicates des fractions <2µm et 2-16µm de la carotte C8 est présentée à la Figure 5.13. La chlorite et les micas (illite) sont dominants dans les deux fractions. La kaolinite est également présente en faibles proportions tout au long des deux profils et se trouve en association avec le talc dans la partie inférieure de l'intervalle L1, où ces deux minéraux présentent leur importance maximale, le talc étant avant tout concentré dans la fraction 2-16µm. Le terme de smectite se réfère ici à des interstratifiés illite-smectite à fort taux de couches gonflantes (80% ou plus). Ce pourcentage est apprécié par l'équation suivante (Moore and Reynolds, 1989): %smectite = 4.7199 * D² - 91.8434 * D + 449.6313, D représentant la différence en °2θ de la position des pics (002) et (003).

5.8. Géochimie des éléments majeurs

La Figure 5.14. présente les profils des éléments associés à la matière organique des carottes C19c et C37, accompagnés de ceux de la teneur en carbone total et en carbone inorganique. Les teneurs en carbone organique, azote et phosphate sont pratiquement constantes au cours des intervalles L5 à L3, une légère augmentation étant toutefois observée à la transition L5-L4, alors qu'une tendance vers des valeurs plus faibles prend place durant l'intervalle L3. Les intervalles L2 et L1 sont caractérisés par une forte augmentation des teneurs en carbone organique, azote et phosphate. Le profil du rapport C/N, qui est un index de l'origine de la matière organique - terrestre ou lacustre - présente de fortes similarités avec celui de la teneur en carbone inorganique de l'intervalle L5 à la base de l'intervalle L2. Les valeurs de l'interface eau-sédiment sont tout à fait comparables à celles des pièges à sédiments (Fig.4.20.).

Les résultats de l'analyse géochimique des autres éléments majeurs est présentée à la Figure 5.15 (carotte C19c). Les profils des teneurs en calcium et en strontium suivent des tendances parallèles à celle du carbone inorganique; le profil du strontium indique donc une incorporation du strontium dans la structure de la calcite. Les autres éléments montrent des tendances parallèles au profil du contenu en résidu insoluble (RI) et donc une association préférentielle avec les silicates. Le magnésium est également préférentiellement lié aux silicates, le profil obtenu permettant de conclure qu'il substitue le calcium de la calcite dans des proportions inférieures à 1%.

L'analyse factorielle en composantes principales (ACP) permet de différencier les trois composantes du sédiment; matière organique (Corg, PO₄), carbonates (Cmin, Ca, Clot) et résidu silicaté (K, Al, Fe, Mg). La situation du SiO₂, intermédiaire entre les pôles "silicate" et "matière organique" est probablement attribuable à la présence de frustules de diatomées dans l'intervalle L1; celle du strontium, intermédiaire entre les pôles "carbonate" et "matière organique" s'explique par sa forte augmentation dans les intervalles L2 et L1. Si nous postulons une teneur de 1400ppm du phytoplancton en strontium (Mason and Moore, 1982), la part du strontium de l'intervalle L1 attribuable à la matière organique autochtone peut être estimée à environ 1/3 (0.008%). La présence de cet élément dans les tissus des organismes phytoplanctoniques pourrait donc expliquer son augmentation au cours des intervalles L2 et L1.

La position des échantillons sur le diagramme de l'ACP (Fig.5.15.) confirme la transition vers une plus forte influence relative du détritus silicaté aux limites L5-L4 et L4-L3, ainsi que leur retour à une influence prépondérante de la phase carbonatée autochtone au niveau de L2, et la prépondérance d'une sédimentation "organo-carbonatée" au niveau de L1.

Nous avons analysé la composition des rares couples bien différenciables de laminations claires et sombres. Les résultats sont présentés à la Figure 5.16. ainsi qu'à l'Annexe 5.5. Les laminations sombres sont légèrement plus riches en matière organique, alors que la proportion de carbonates est sensiblement la même dans les deux types. Les laminations sombres pourraient donc correspondre à la période non stratifiée durant laquelle la sédimentation est la plus riche en matière organique (Fig.4.18). La relativement forte teneur en carbonates des laminations sombres peut être attribuée à l'influence de la resuspension et éventuellement également à l'imprécision de la prise d'échantillon.

5.9. Variation spatiale de la composition du sédiment de surface

La composition du sédiment de surface varie en fonction de la bathymétrie et de l'éloignement des principales sources d'apports (Fig.5.17.). Le sédiment de la baie lacustre est fortement carbonaté, à 85% en moyenne dans les carottes analysées. Le pourcentage de carbonates décroît avec la profondeur; il atteint en moyenne 68.7% sur les tombants et 66.2% dans la zone profonde. Le tombant et la plaine du bassin SE ont une proportion de carbonates 5 à 10% moins élevée que leurs équivalents du bassin NW, ce qui s'explique par leur plus grand éloignement des sources d'apports.

Ces résultats sont en désaccord partiel avec ceux de Kübler et al. (1979). Ces derniers indiquent une légère augmentation du pourcentage de carbonates avec la profondeur sur le plateau lacustre et la partie supérieure du tombant de la région de Neuchâtel (NE du lac). Cette côte a toutefois été fortement perturbée par l'homme au cours des dernières décennies et il est également probable que de fortes disparités spatiales de la composition du sédiment de surface existent dans les zones périphériques de profondeur faible.

5.10. Reconstitution du taux d'accumulation récente et datation des apports de talc

Dater les sédiments permet de fixer dans le temps les modifications observées dans la sédimentation et de reconstituer les taux d'accumulation.

Le taux d'accumulation récente a été reconstitué pour la carotte C37 par les méthodes du 137-Cs et du 210-Pb. L'activité du Plomb-210 en excès par gramme de sédiment sec versus le poids cumulé de sédiment est présenté à la Figure 5.18. Deux modèles ont été utilisés afin de reconstituer les taux d'accumulation: le

modèle C.R.:C.S. (Fig.5.18.A) et le modèle c.r.s. (Fig.5.18.B). Les résultats de ces deux reconstitutions sont très semblables.

Dans les datations qui utilisent le Plomb-210, on fait généralement l'hypothèse que le flux de Plomb-210 de l'eau vers le sédiment est constant. Dans la majorité des cas, on assume également que le flux de sédiment est constant (Oldfield and Appleby, 1984). Dans ce cas, la concentration en Plomb-210 en excès dans le sédiment varie exponentiellement avec le poids cumulé de sédiment selon la formule:

$$C = C_{(0)} e^{-kx/r} \quad (5-1)$$

où:

- $C_{(0)}$ est la concentration de Plomb-210 en excès à l'interface eau-sédiment

- r est le taux d'accumulation sec

et:

$$k = \frac{\ln 2}{22.26} \approx 0.03114 \text{ an}^{-1} \quad (5-2)$$

est la constante de désintégration du Plomb-210.

La relation entre concentration de Plomb-210 en excès versus poids cumulé de sédiment donne alors une droite dont la pente ($-k/r$) permet de calculer le taux d'accumulation (r). Ce modèle de datation est appelé C.R.:C.S. (constant flux, constant sedimentation rate).

Dans notre cas (Fig.5.18. et Annexe 5.12.A), plusieurs segments de droite de régression du Plomb-210 en excès en fonction du poids de sédiment accumulé ont été utilisés pour calculer les taux d'accumulation. Ceux-ci augmentent de 0.045 ± 0.010 [$\text{gcm}^{-2}\text{an}^{-1}$] entre 30 et 20cm de profondeur à 0.070 ± 0.008 [$\text{gcm}^{-2}\text{an}^{-1}$] entre 20 et 16cm et à 0.121 ± 0.016 [$\text{gcm}^{-2}\text{an}^{-1}$] de 16cm à 0cm de profondeur. Des valeurs pratiquement constantes de Plomb-210 en excès sont observées entre 21 et 19cm et entre 17 et 14cm de profondeur. Ce type d'évolution est généralement interprétée comme étant due à un événement sédimentaire instantané. Toutefois, aucun événement anormal n'étant enregistré dans la lithologie, ni dans les profils de porosité, de carbone (total et organique) et de talc, le taux d'accumulation a été calculé sur la diminution logarithmique du Plomb-210 en excès entre 19 et 17cm de profondeur et la valeur obtenue considérée comme caractéristique du taux d'accumulation entre 16 et 20cm de profondeur. Cette manière de faire revient donc à attribuer les taux de sédimentation des segments adjacents aux intervalles qui comportent des valeurs constantes de Plomb-210 en excès. Ceci n'est que partiellement satisfaisant, d'où l'essai d'application d'un second modèle, le modèle c.r.s. (constant rate of supply).

Ce modèle postule un apport constant de plomb-210 au sédiment et un taux variable d'accumulation de sédiment.

Si A est la somme cumulative du Plomb-210 en excès au-dessous d'une profondeur x ;

$$A = \int_x^\infty \rho C dx \quad (5-3)$$

ρ : densité du sédiment; C : concentration du Plomb-210 en excès; x : profondeur

alors l'âge t du sédiment à la profondeur x satisfait à l'équation:

$$A = A_{(0)} e^{-kt} \quad (5-4)$$

où $A_{(0)}$ est la somme cumulative du Plomb-210 en excès dans la colonne sédimentaire.

Le taux de sédimentation est alors calculé d'après la formule:

$$r = \frac{kA}{C} \quad (5-5)$$

Les résultats de ce modèle (Fig.5.18.B et Annexe 5.12.B) sont très proches de ceux du modèle C.R.:C.S. et, dans la suite de notre propos, les datations selon le modèle C.R.:C.S. sont considérées. Il a toutefois l'avantage de traiter de manière plus logique les intervalles où le Plomb-210 en excès est constant avec la profondeur. Dans l'idéal, il faudrait dater d'autres carottes avec la même méthode pour décider lequel des deux modèles est le plus valable et pour obtenir une datation plus satisfaisante.

Il nous faut encore mentionner que l'activité du radium est extrêmement variable dans le profil de C37 (Annexe 5.12.A). L'origine de cette particularité reste à établir.

Le taux d'accumulation déduit de la méthode du Césium-137 augmente 0.099 ± 0.037 [$\text{gcm}^{-2}\text{an}^{-1}$] pour la période 1964-1986 (soit du maxima des retombées des essais nucléaires atmosphériques à l'accident de Tchernobyl) et à 0.196 ± 0.052 [$\text{gcm}^{-2}\text{an}^{-1}$] pour la période 1986-1993. Le taux d'accumulation déduit pour la période 1964-1993 se monte à 0.123 [$\text{gcm}^{-2}\text{an}^{-1}$], ce qui est en bon accord avec les résultats de la méthode 210-Pb (0.121 [$\text{gcm}^{-2}\text{an}^{-1}$]).

Les taux d'accumulation obtenus ont été utilisés pour dater les apports de talc. Le rapport maximal entre l'intensité RX du talc (pic d'intensité maximale: 28.62°2θ) et la somme des intensités RX maximales de tous les phyllosilicates identifiés (M, Chl, Kaol, Talc) ([Talc/Phyllo], fraction 2-16µm; Fig.5.13.) est utilisé dans ce but. Il est daté 1952AD±4ans.

5.10.1. Variation spatiale du taux d'accumulation récente

Deux niveaux de corrélation ont été utilisés afin de reconstituer les taux d'accumulation récente des carottes analysées; le rapport maximal [Talc / Somme des phyllosilicates] ainsi que le niveau de corrélation No.3 issu des profils de teneur en carbone (Figs.5.6. et 5.7.). Cette manière de faire postule que les événements que traduisent ces niveaux sont synchrones dans l'ensemble du lac. Les taux d'accumulation des différentes carottes ont été normalisés au taux récent de la carotte C37, soit 0.121 [gm⁻²an⁻¹] ou 3.02mm/an (taux d'accumulation du sédiment humide). Les résultats sont présentés à la Figure 5.19. Ils sont cohérents d'une méthode à l'autre. On observe une dépendance du taux d'accumulation par rapport à la profondeur du site, la droite de régression pouvant être définie de la manière suivante pour le taux d'accumulation basé sur le niveau de corrélation No.3.:

$$\text{tx d'accumulation humide} = (0.734 + 0.0165z) \quad [\text{mm/an}] \quad (5-6)$$

z: profondeur (m)

Cette droite ne peut être considérée que comme indicative, la répartition des points n'étant pas normale (absence de points entre 80 et 100m).

Discussion

La reconstitution des taux d'accumulation récente suggère une dépendance de la profondeur d'eau, ce qui indique un focusing du sédiment.

La réalité et l'importance de ce focusing peut être testée en comparant le flux de Plomb-210 dans le sédiment avec le flux atmosphérique du Plomb-210. Le flux de plomb-210 vers le sédiment est évalué en multipliant la concentration en surface (C(0)) par le taux de sédimentation. Le résultat (1.43±0.30[dpm/cm²*an]) est assez nettement supérieur aux mesures du flux atmosphérique réalisées par Dominik et al. (1987) à l'embouchure du Rhône dans le Léman (0.919±0.009[dpm/cm²*an]) et par Dominik et al. (1993) près de Morges (0.89±0.02[dpm/cm²*an]). Si on postule que le flux atmosphérique sur le lac de Neuchâtel est semblable à celui sur le Léman, on peut alors supposer un focusing de sédiment relativement important.

Des taux de sédimentation différents sont enregistrés à des sites de profondeur similaire de la zone profonde. La composition du sédiment variant faiblement d'un site à l'autre, ces différences sont à relier à des variations spatiales du focusing de sédiment plutôt qu'à une variation de la quantité des apports allochtones. Les taux de sédimentation des sites du bassin NW montrent notamment une relativement forte variabilité (Tab.5.1.), qui se marque également au niveau des taux d'accumulation des carbonates. Ce fait pourrait refléter des sources différentes du matériel carbonaté, autochtone versus allochtone. Cependant, ni les rapports [Calcite/(Dolomite+Ankérine)] ni les rapports isotopiques δ¹⁸O des carbonates ne varient significativement spatialement, ce qui rend cette cause improbable.

Le cycle annuel de la resuspension du sédiment pourrait être à l'origine de la variabilité spatiale de la sédimentation. La resuspension est en effet susceptible de résulter en une migration hétérogène de la matière en suspension en direction des zones moins énergétiques du fond du lac. Notre grille d'échantillonnage est toutefois trop grossière pour vérifier si des tendances existent à l'échelle du lac entier, tendances qui pourraient éventuellement être reliées avec un régime préférentiel de la circulation hydrodynamique.

Site	Carbonates (%)	δ ¹⁸ O (‰)	Taux d'accumulation (mm/an)	Taux d'accumulation de carbonates (mm/an)	Calcite/ (Dolomite+ Ankérine)
C13	63.6	-8.5	4.09	2.60	57.3
C37	68.0	-8.3	3.00	2.04	58.4
C20	69.1	-8.6	3.00	2.07	65.4
C23	65.1	-8.3	1.97	1.28	-
Areuse		-5.5			11.4

Tab.5.1. Teneur en carbonates, rapport δ¹⁸O des carbonates, taux d'accumulation totale et de carbonates et rapport (Calcite/Dolomite+Ankérine) des sites du bassin NW

5.11. Dispersion des apports de talc

Cette étude de la dispersion des apports de talc et de kaolinite d'origine industrielle a été entreprise en vue de vérifier l'hypothèse de l'existence de sites privilégiés de sédimentation dans le lac de Neuchâtel. D'après la répartition du talc et de la kaolinite en suspension dans le lac, Bapst (1987) a en effet émis l'hypothèse de l'existence de circulations hydrodynamiques particulières, qui isoleraient les sous-bassins topographiques du lac les uns des autres.

L'origine anthropogénique des apports de talc dans le lac de Neuchâtel a été démontrée par Ruch et al. (1989). La source de ces apports a été reliée à une ancienne papeterie, située à Serrières, quelques kilomètres à l'ouest de la ville de Neuchâtel (Fig.5.20.), et où en compagnie de la kaolinite, le talc était utilisé en tant qu'additif dans la production de papier (Bapst, 1987; Ruch et al. 1989). Les eaux industrielles de cette entreprise étaient déversées dans la Serrière, affluent du lac. Cette papeterie a cessé sa production à l'automne 1981.

Le talc et la kaolinite sont présents dans le sédiment à partir de l'intervalle L2 et montrent des maxima d'intensité de manière associée (Fig.5.13.) dans toutes les carottes analysées. Ces deux minéraux ont été détectés dans la matière particulaire en suspension dans le lac, alors que seule la kaolinite a été détectée lors de notre étude dans la matière particulaire des affluents. Toutefois, Atteia (comm.pers.) a détecté du talc dans les fractions fines (<1µm) de la Noiraigue, un affluent de l'Areuse, ce qui est probablement à mettre en relation avec la présence de talc dans certains engrais (Adate, comm.pers.; analyses d'engrais).

Le talc est présent en association avec la kaolinite dans les 10 à 50cm supérieurs du sédiment et les rapports maximaux [Talc/Phyllo] diminuent avec l'accroissement de la distance du site C8 (Fig.5.20.), ce qui d'une part confirme le caractère anthropogénique des apports de talc et d'autre part renforce l'évidence que l'ancienne papeterie de Serrières est bien à l'origine des apports conjoints de talc et de kaolinite. Les différences temporelles entre le rapport [Talc/Phyllo] et la production de papier à Serrières (Fig.5.20.A) est probablement due au remplacement progressif du talc et de la kaolinite par du carbonate de calcium dans la production de papier ainsi qu'à l'amélioration du système de circulation en circuit fermé dans l'usine. La présence de talc dans les sédiments après 1981 peut être attribuée à une combinaison des influences de la bioturbation et de la resuspension. D'autres sources, comme par exemple l'utilisation d'engrais contenant du talc, peuvent également y contribuer pour une part. La première apparition du talc dans le sédiment peut être datée aux alentours de 1860-1870, ce qui correspond à peu près aux premières utilisations attestées de talc dans la fabrication du papier.

Remarquez à la Figure 5.20. le dédoublement du pic [Talc/Phyllo] de la carotte C7. Le sédiment de cette carotte est massif à laminé de manière diffuse, et la succession des intervalles lithostratigraphiques est similaire à celle des autres sites. Les résultats de la granulométrie sont semblables à ceux de la carotte C19c. Afin d'appréhender l'origine de ce double pic, deux autres carottes ont été prélevées sur le même site (C7b et C7c; Fig.5.21.). Les lithologies des carottes C7 et C7c sont semblables alors que les profils du rapport [Talc/Phyllo] diffèrent totalement. La lithologie de la carotte C7b diffère des deux autres colonnes sédimentaires et n'est pas corrélable avec celles-ci pour toute sa partie centrale, qui est constituée d'un sédiment fin et d'aspect massif, pauvre en matière organique et pratiquement exempt de talc, et marqué par un niveau érosif à sa base (cf. également Fig.5.3.). Ce site est donc marqué par une resédimentation de sédiment avec des variations de faciès importantes à très petite échelle.

En l'absence de méthodes satisfaisantes de quantification des phyllosilicates, une méthode qualitative et une méthode semi-quantitative ont été utilisées afin d'estimer l'évolution spatiale de la dispersion des apports de talc. La première méthode considère simplement l'évolution spatiale du rapport maximal [Talc/Phyllo], alors que la méthode semi-quantitative mène à une estimation de la concentration moyenne ainsi que de l'accumulation totale du talc par site. Cette estimation est opérée en divisant tout d'abord les intensités RX du talc par la somme des intensités RX des phyllosilicates (Mica + Chlorite + Kaolinite + Talc) dans la fraction 2-16µm. On obtient ainsi un pourcentage de talc dans les phyllosilicates, pourcentage qui est rapporté à la proportion de résidu insoluble en considérant la teneur en phyllosilicates comme une constante, et en la fixant à 1/3. Le pourcentage de résidu insoluble étant connu, le résultat obtenu peut être rapporté au sédiment total. Les équations de l'estimation de l'accumulation totale de talc (TA_{talc}) et de la concentration moyenne en talc (C_{talc}) s'écrivent comme suit:

$$TA_{talc} = \sum_0^n \{ h_n(T/P)_n \times \rho_s(1-\Phi)_n \times (RI_n/3) \} \quad [gcm^{-2}] \quad (5-7)$$

où:

n : profondeur (cm)

h_n : épaisseur du niveau d'échantillonnage

$(T/P)_n$: Talc/(Mica + Chlorite + Kaolinite + Talc) dans la fraction 2-16µm (intensités RX maximales de chaque minéral)

ρ_s : densité du sédiment sec; Φ : porosité

RI_n : pourcentage de résidu insoluble

$$C_{\text{talc}} = \sum_0^n \{h_n(T/P)_n \times \rho_s(1-\Phi)_n \times (RI_n/3)\} / nP/T_{\text{max}} \text{ [gcm}^{-3}\text{]} \quad (5-8)$$

nP/T_{max} : profondeur du rapport [Talc/Phyllo] maximal

La méthode semi-quantitative adoptée est basée sur plusieurs hypothèses simplificatrices; que la composition de la fraction 2-16mm est représentative de celle du résidu insoluble dans sa totalité; que l'intensité RX maximale de chaque phyllosilicate est représentative de sa quantité; et que la proportion des phyllosilicates dans le résidu insoluble est constante. Cette procédure est néanmoins appliquée de la même façon pour toutes les carottes analysées. En outre, afin de tester le bien-fondé de cette méthode, nous avons ajouté des montants connus de talc à un sédiment exempt de talc issu de la carotte C20 (intervalle L3). La même procédure d'analyse et de calcul a été appliquée à ces échantillons. Les résultats sont présentés à la Figure 5.22.A. On observe une bonne concordance entre les teneurs en talc réelles et calculées ($r^2=0.97$). Une erreur relativement élevée est toutefois probablement effective pour de faibles concentrations en talc, près du seuil de détection.

La concentration moyenne en talc, son accumulation totale ainsi que le rapport [Talc/Phyllo] maximal montrent tous trois une diminution de type exponentiel avec l'augmentation de la distance à la source présumée des apports. Des relations exponentielles différentes sont toutefois valables pour les bassins NW et SE du lac: le rapport [Talc/Phyllo], la concentration en talc et l'accumulation totale de talc décroissent plus rapidement au sein du bassin SE.

Discussion

La diminution de la concentration en talc du sédiment et de l'accumulation totale de talc en fonction de la distance à la source présumée renforce l'hypothèse que l'ancienne papeterie de Serrières a constitué la source de ces apports. Il ne semble pas y avoir de sites privilégiés de déposition du talc et il n'y a donc pas lieu d'évoquer l'existence d'un régime préférentiel de la circulation hydrodynamique pour expliquer sa dispersion.

Une modélisation numérique du transport de particules relâchées à l'embouchure de l'Areuse (Thunus et al., 1994) semble indiquer que la dorsale de "La Motte" pourrait constituer un obstacle vis à vis de leur dispersion en direction du bassin SE, une partie d'entre elles étant susceptibles de se déposer sur la dorsale elle-même. Ceci pourrait donc expliquer la plus forte diminution des apports de talc avec la distance à travers le bassin SE du lac.

5.12. Reconstitution paléoenvironnementale

5.12.1. Introduction

Ce paragraphe vise à reconstituer les modifications de l'environnement qui ont affecté le lac et son bassin versant depuis environ 1500 ans, soit au cours d'une période qui a connu une emprise croissante de l'homme sur son environnement. Pour ce faire, différentes analyses ont été entreprises; analyses polliniques, assemblages faunistiques des ostracodes, et assemblages des diatomées. Des informations peuvent être également obtenues de la composition minéralogique et géochimique du sédiment ainsi que de la reconstitution des taux d'accumulation.

5.12.2. Analyses polliniques

Le diagramme pollinique de la carotte C19c est présenté à la Figure 5.23. Le pas d'échantillonnage est de 2cm. Les analyses ont été effectuées par Olivier Pueras, du Laboratoire de chrono-écologie de l'Université de Franche-Comté, à Besançon. Deux zones polliniques locales (LPAZ), subdivisées en cinq sous-zones ont été définies. La représentation continue des pollens de noyer (*Juglans*), de charme (*Carpinus*) et de céréales (*Cerealia*) confirme que l'intervalle de temps couvert par cette colonne sédimentaire est situé en totalité dans l'ère chrétienne. Les repères chronologiques indiqués pour chaque zone ou sous-zone pollinique sont calculés en postulant un taux d'accumulation constant au sein des intervalles situés entre deux datations. Le calage temporel fourni par les datations ^{14}C -AMS ainsi que par la biochronologie de Philippe Hadorn sur la carotte LN01 (Fig.5.8.) permet d'estimer une fourchette d'erreur sur ces repères chronologiques de l'ordre d'un siècle, voire de deux cents ans au maximum. Les corrélations entre carottes effectuées à l'aide du contenu en carbone total nous semblent en effet tout à fait dignes de confiance.

Zone pollinique 1 (LPAZ 1): 81 à 40cm; env. 450-1250AD

Cette zone se caractérise par des taux importants de *Picea* (25-35%). Elle est subdivisée en trois phases ou sous-zones distinctes:

Zone pollinique 1a (LPAZ 1a): 81 à 76cm; env. 450-550 AD

Elle est caractérisée par une importance élevée d'*Abies* (15-20%) et par la proportion de pollens non arboréens (NAP) la plus faible du profil (10-15%).

Zone pollinique 1b (LPAZ 1b): 76 à 70cm; env. 550-650AD

La représentation d'*Abies* laisse apparaître une forte régression (de 15-20% vers 5-10%) alors que les pollens non arboréens montrent une augmentation du même ordre. Le relativement fort pourcentage de NAP au sommet de cette sous-zone correspond au minima enregistré dans la courbe du carbone inorganique à la base de L4.

Zone pollinique 1c (LPAZ 1c): 70 à 40cm; env. 650-1300AD

Cette phase voit la croissance puis la stabilisation de la représentation de *Quercus*, alors que les valeurs d'*Abies* restent stables et faibles (env.5%). Les pollens non arboréens atteignent leur maxima du profil entier au sommet de la sous-zone, en correspondance avec le minima de teneur en carbone inorganique enregistré à la base de L3.

Zone pollinique 2 (LPAZ 2): 40 à 0cm; env. 1300AD à 1993AD

Cette zone se différencie de la zone 1 principalement par les plus faibles représentations de *Picea* et d'*Abies* et par l'apparition de taux conséquents de *Pinus* ainsi que par la progression de la représentation de *Juniperus*. Deux sous-zones peuvent être différenciées:

Zone pollinique 2a (LPAZ 2a): 40 à 22cm; env. 1300-1650AD

La fréquence de *Picea* diminue fortement dans la partie inférieure de cette sous-zone pour atteindre des minimas de quelques pourcents entre 33 et 25cm. La représentation d'*Abies* est légèrement inférieure à celle de la zone 1c. Les taxons dont l'abondance augmente par rapport à la zone 1c sont principalement *Pinus* qui passe de 10% à 25-30%, et *Juniperus* qui atteint des valeurs maximales d'environ 5%.

Zone pollinique 2b (LPAZ 2b): 22 à 0cm; env. 1650AD à 1993AD

L'abondance de *Picea* laisse apparaître une réaugmentation d'environ 10% (passage de 5% vers 15% d'abondance). *Betula*, *Corylus*, *Fagus* et surtout *Alnus* montrent des abondances légèrement plus élevées au détriment de *Juniperus*, d'*Abies* et de *Quercus*.

Comme nous l'avons mentionné au chapitre précédent (cf. 4.4.10.), la carotte courte LN01 (Vorlot) analysée par Philippe Hadorn (cf. Fig.5.8.) laisse apparaître des abondances de *Picea* et de *Pinus* plus faibles que dans C19c (*Picea*: <15% dans LN01, jusqu'à 35% dans C19c), alors que les pollens de feuillus y sont de manière générale mieux représentés, en particulier en ce qui concerne *Fagus* (5-20% dans LN01, <5% dans C19c). Comme l'étude de la sédimentation des pollens permet de le postuler (cf. 4.4.10.), il est possible que les pollens à ballonets comme *Picea* et *Pinus* soient remis plus facilement en suspension que les pollens d'angiospermes. Dans cette optique, le site C19 serait donc un lieu privilégié d'accumulation, ce qui est cependant en contradiction avec les résultats du taux d'accumulation enregistré à ce site ainsi qu'avec d'autres conclusions de l'étude de la sédimentation actuelle, qui postulent que le pourcentage de sédiment remis en suspension diminue avec la profondeur. Une seconde possibilité à considérer est le transfert latéral depuis le plateau lacustre de sédiment riche en pollens à ballonets. Le site C19 serait alors un endroit privilégié de redéposition de matériel en provenance du plateau lacustre. Il apparaît clairement que nous ne possédons pas la clé de ce problème et que de plus amples recherches sont nécessaires, notamment au niveau de l'analyse pollinique du sédiment de surface.

Malgré ces différences au niveau des abondances des différents taxons, de fortes similitudes s'observent entre les carottes C19c et LN01; le passage L5-L4 se marque également par une progression des NAP. Quant à la base de l'intervalle L3, LN01 est également marquée par une diminution de *Picea* et une augmentation de *Pinus*, aux amplitudes toutefois moins importantes qu'en ce qui concerne C19c. La transition L4-L3 est dans LN01 suivie d'une phase d'augmentation des abondances de *Corylus*, *Alnus*, *Betula* et *Juniperus*, ce dernier taxon laissant apparaître une augmentation concordante dans les deux carottes. La corrélation proposée entre ces deux carottes en figure 5.8. apparaît donc cohérente au niveau de la palynologie. Ceci suggère que de fortes disparités spatiales existent au niveau de la sédimentation des pollens et met en évidence l'importance de l'utilisation de moyens indépendants en vue de dater le sédiment et de corréler les colonnes sédimentaires entre elles. Bien que la carotte C19 ne soit pas datée, les corrélations établies à l'aide notamment de la teneur en carbone total avec C19 et avec d'autres colonnes sédimentaires permettent de contourner les problèmes rencontrés au niveau de la palynostratigraphie.

5.12.3. Assemblages fossiles d'ostracodes

Les ostracodes constituent une sous-classe des Crustacés (Hartmann and Puri, 1974; Maddocks, 1982; Moore, 1961). Leur taille est limitée, comprise entre 0.3 et 30mm, généralement inférieure à 2mm dans les lacs européens. Leur corps est contenu dans deux valves dont la charnière est située dans la partie dorsale et qui forment ainsi une coquille (ou carapace) en calcite. Ils sont généralement benthiques et vivent alors à la surface du sédiment ou dans les centimètres supérieurs du sédiment (épi- ou endobenthiques), mais sont parfois planctoniques (Carbonel et al., 1988). Ils sont présents dans pratiquement la totalité des environnements aquatiques, lacs d'eau douce, étangs, milieu marin et eaux saumâtres, eaux souterraines (Danielopol, 1971; Holmes, 1992). Leurs valves en calcite sont souvent préservées dans les séquences sédimentaires.

Les ostracodes sont extrêmement sensibles aux modifications de leur environnement et peuvent donc fournir d'importantes informations paléoenvironnementales. L'existence et la productivité des ostracodes dans un milieu aquatique est contrôlée par plusieurs facteurs tels que la profondeur, les courants, la température, la chimie de l'eau, la disponibilité en oxygène dissous, le type de substrat, la prédation ou la disponibilité en apports nutritifs (pour une vision d'ensemble de la question, lire par exemple Carbonel, 1988, De Deckker, 1988, Delorme, 1991, Holmes, 1992, Palacios-Fest, 1994).

La chimie de leurs valves peut également fournir des informations précieuses; les rapports isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ de la calcite des valves traduisent la composition isotopique de l'eau environnante (Lister, 1988a; Lister, 1988b), alors que les rapports Mg/Ca et Sr/Ca renseignent sur les variations de température, de salinité et de composition chimique des eaux (Chivas et al., 1986; De Deckker et al., 1988).

Sept espèces d'ostracodes ont été recensées de manière certaine dans les sédiments de la carotte C19c. Il s'agit bien évidemment de valves, les parties molles étant très rarement préservées. La détermination a été effectuée par Walter Geiger, de l'*Institut für Limnologie der Österreichischen Akademie der Wissenschaften*, à Mondsee. Il s'agit des espèces suivantes¹:

- Super-fam. Cypridoidea Baird 1845
 - Famille Candoniidae Kaufmann 1900
 - Sous-famille Candoninae Daday 1900
 - Genre *Candona* Baird
 - Candona neglecta* Sars 1887 (Fig.5.24.A-C)
 - Sous-famille Cyclocyprinae Hoff 1942
 - Genre *Cyclocypris* Brady et Norman
 - Cyclocypris ovum* Jurine (Fig.5.25.D)
 - Genre *Cypria* Zenker
 - Cypria ophthalmica* Jurine 1820 (Fig.5.25.E-F)
 - Famille Ilyocyprididae Kaufmann 1900
 - Genre *Ilyocypris* Brady
 - Ilyocypris bradyi* Sars 1890 (Fig.5.25.A)
- Super-fam. Cytheroidea Baird 1850
 - Famille Limnocytheridae Klie 1938
 - Genre *Limnocythere* Brady 1867
 - Limnocythere sanctipatricii* Br. et Rob. 1869 (Fig.5.24.D)
 - Genre *Leucocythere*
 - Leucocythere mirabilis* Kaufmann (Fig.5.24.F)
 - Famille Neocytherideidae Puri 1957
 - Genre *Cytherissa* Sars
 - Cytherissa lacustris* Sars 1863 (Fig.5.25.B-C)

Ces espèces sont présentées sous forme de planche photographique aux Figures 5.24., 5.25. et 5.26. Le dimorphisme sexuel de *Candona neglecta* est clairement visible à la Figure 5.24.A) et B). Les adultes mâles de *Limnocythere sanctipatricii* et de *Leucocythere mirabilis* (Fig.5.24.D) et F) se différencient de par le rapport partie postérieure / partie antérieure plus grand chez *L.sanctipatricii* et du fait que la partie antérieure de *L.mirabilis* est plus large que la partie postérieure, ce qui n'est pas le cas pour *L.sanctipatricii*. *Cytherissa lacustris* laisse apparaître des variations au niveau de l'intensité de la nodation de sa coquille (Fig.5.25.B) et C), ce qui a été relié par Carbonel et al. (1990) à la quantité de matière organique allochtone présente. De nombreuses valves présentent à leur surface un réseau en "toile d'araignée" (Cf. Fig.5.25.E) et F), Fig.5.26.A), dont la cause est discutée, une cause possible étant une attaque par des champignons qui serait favorisée par un faible taux de sédimentation impliquant une longue exposition à l'interface eau-sédiment (Geiger, comm.pers.). Il se pourrait également que ce soit simplement dû à la préparation des échantillons pour l'analyse au microscope électronique (Lister, comm.pers.).

¹ D'après la classification systématique de Bowman and Abele (1982)

Les exigences écologiques des espèces recensées sont résumées ci-après. Les caractéristiques répertoriées se basent sur les travaux suivants: Nüchterlein (1969), Hiller (1972), Vesper (1975), Löffler (1986; 1990), Danielopol et al. (1990; 1989), Carbonel et al. (1990), Geiger (1990), ainsi que les renseignements fournis par la compilation de Schwalb (1992).

Candona neglecta se rencontre aussi bien dans les zones littorales que dans les zones profondes des lacs. Cette espèce supporte un assèchement périodique et de relativement grands changements de température bien qu'elle préfère les eaux froides.

Cypria ophthalmica est la seule espèce planctonique. Elle se rencontre avant tout dans les zones littorales et sublittorales des lacs. Elle est répandue pratiquement dans le monde entier, ce qui est probablement dû au fait qu'elle est extrêmement résistante face à de grandes différences de température ainsi qu'à l'assèchement, et qu'elle n'a pas de préférence marquée pour le milieu. Cette espèce ne disparaît pas lorsque des conditions méromictiques apparaissent et est très tolérante face à l'augmentation de l'eutrophisation.

Ilyocypris bradyi habite les fonds vaseux dans des eaux calmes à agitées. C'est une espèce également très tolérante face à l'augmentation de l'eutrophisation.

Cytherissa lacustris est considérée comme un excellent indicateur du début de l'augmentation de l'eutrophisation. Elle possède la coquille à la densité spécifique la plus élevée des ostracodes européens, ce qui entraîne qu'elle ne peut se déplacer qu'au sein du sédiment, où elle creuse jusqu'à 2cm de profondeur. Elle préfère les eaux froides (rarement rencontrée au-dessus de 18°C) et nécessite des eaux bien oxygénées, au moins 4mg/l. Elle possède un temps de développement relativement long.

Limnocythere sanctipatricii et *Leucocythere mirabilis* ont également un cycle de développement relativement lent et sont sensibles à la teneur en oxygène dissous. Elles préfèrent des sédiments fins, des eaux oligotrophes et une teneur en matière organique faible. Ce sont donc deux espèces sensibles à l'augmentation de l'eutrophisation. Le statut de *Leucocythere mirabilis* est même considéré comme précaire en Europe, étant donné la dégradation rapide de son milieu (Danielopol et al., 1989).

La présence de *Candona studei* est sujette à caution dans les sédiments de C19c et des valves de cette espèce peuvent avoir été confondues avec *C. neglecta*. De même, il est possible qu'une partie des valves déterminées comme étant *Ilyocypris bradyi* soient en fait des valves d'*Ilyocypris lacustris* (Geiger, comm.pers.). Il est à noter que d'autres espèces ont été inventoriées dans le lac de Neuchâtel lors d'investigations touchant le sédiment de surface: *Candona levanderi* (identifiée par Ulrich von Grafenstein), *Cypridopsis vidua**, *Herpetocypris reptans**, *Fabaeformiscandona protzi**, *Fabaeformiscandona caudata* "caudata"*, *Candona studei*, *Candona candida* et *Limnocythere inopinata* (espèces identifiées par Walter Geiger).

Les résultats des comptages de la carotte C19c sont présentés à la Figure 5.27. Deux comptages ont été effectués; comptage des valves de la fraction >200µm (Fig.5.27.B) et comptage des valves de la fraction >63µm (Fig.5.27.A). Les résultats sont normalisés à 30g de sédiment humide. Les valves de *Leucocythere mirabilis* et de *Limnocythere sancti-patricii* ont été rassemblées en un seul profil de même que celles de *Candona neglecta* et des supposées valves existantes de *Candona studei*, la différenciation des stades juvéniles de ces espèces étant impossible. Seules deux valves de *Cyclocypris ovum* ont été inventoriées et ne sont pas représentées sur les profils.

Le nombre total de valves varie entre 1000 et 5000 pour la fraction >63µm et entre 500 et 1500 pour la fraction >200µm. La diminution régulière du nombre de valves de la base de l'intervalle L3 en direction de la surface ne peut entièrement s'expliquer par la porosité plus élevée enregistrée à proximité de la surface. Il est probable que l'augmentation récente de la productivité a entraîné une légère diminution des effectifs d'ostracodes.

Les *Candona* constituent le genre dominant tout au long du profil, comme cela se vérifie pour l'intégralité de l'enregistrement Holocène (Schwalb, 1992). Il est frappant de constater que les variations principales de l'abondance relative des espèces se situent au niveau des limites lithologiques. En considérant la fraction >63µm (Fig.5.27.A), la fréquence de *Limnocythere* et de *Leucocythere* diminue et passe de 25-30% à environ 15% aux transitions L5-L4 et L4-L3 et laisse apparaître également une forte diminution dans les deux intervalles supérieurs, L2 et L1, passant de 25% à 5% environ. *Ilyocypris* et *Cypria* montrent des tendances partiellement opposées à celles des *Limno*- et des *Leucocythere*; l'abondance d'*Ilyocypris* augmente légèrement à la transition L5-L4 et plus fortement à la transition L4-L3 pour atteindre des valeurs de l'ordre de 7.5-10% jusqu'en surface du sédiment; le profil de l'abondance de *Cypria* laisse apparaître une très forte augmentation à la transition L5-L4, de quelques valves à 20-25% de fréquence. Outre la base de L4, les valeurs les plus élevées de l'abondance de *Cypria* se situent au niveau de la légère diminution de teneur en carbone organique du centre de L4, à la base de L3 ainsi que dans l'intervalle L1. Le profil de *Cytherissa* est quant à lui avant tout marqué par une très forte augmentation des abondances au niveau de L1 (5-10%), les valeurs restant inférieures à 2.5% pour le reste du profil. La fraction >200µm laisse dans les grandes lignes apparaître les mêmes caractéristiques que la fraction >63µm.

* valves seulement

Nous avons également procédé au comptage des valves d'ostracodes des 4 mètres supérieurs de la carotte LN01 (cf. Schwalb, 1992), afin de reconstituer les variations antérieures de la distribution des espèces d'ostracodes. Les résultats sont présentés à la Figure 5.28. Comme dans le cas de C19c, les abondances relatives de *Limnaea* et de *Leucocythere* diminuent durant les périodes de faible teneur en carbone inorganique, et en particulier au niveau de la transition L5-L4, pour atteindre des valeurs très faibles (env. 5%). La proportion d'*Ilyocypris* diminue également au passage L5-L4, alors que les valeurs de *Cypria* sont relativement constantes, contrairement à ce qui est observé pour la carotte C19c.

Il est à noter qu'outre les ostracodes, des lamellibranches vivent dans les eaux profondes du lac de Neuchâtel. Nigel Thew, du Service cantonal d'archéologie, a identifié des valves d'une espèce de lamellibranches dans la carotte C19c (prélevée par 55m de profondeur). Il s'agit de *Pisidium conventus*.

5.12.4. Etude des diatomées de la carotte C19c

Les diatomées des sédiments du lac de Neuchâtel ont déjà été étudiées par Wüthrich (1960; 1961) et par Straub (1990, in Schwalb, 1992). Des études phytoplanctoniques ont également concerné les diatomées (Fuhrmann, 1900; Wüthrich, 1965).

La présente étude a été entreprise par J.-C. Druart, de l'INRA à Thonon-les-Bains. Elle a pour but de reconstituer les évolutions trophiques qui se sont succédées dans le lac de Neuchâtel depuis 1500BP.

Les résultats sont présentés à la Figure 5.29. Deux épisodes peuvent être différenciés; un premier épisode regroupant les intervalles L5, L4 et L3, où très peu de diatomées sont présentes (6-30 frustules par mg de sédiment sec). Deux taxons littoraux et un taxon pélagique sont régulièrement présents dans ces trois intervalles; ce sont *Gomphonema angustum* qui d'après Krammer et Lange-Bertalot n'est relativement fréquente qu'en eau oligotrophe et recule devant l'augmentation de la pollution, *Fragilaria pinnata*, espèce à grande amplitude écologique, et *Cyclotella distinguenda*, taxon pélagique qui d'après la littérature peut se retrouver dans des eaux relativement chargées en électrolyte. Les formes planctoniques sont quasiment absentes de cet épisode, ce qui peut être relié à leur plus grande fragilité face à la dissolution dans un milieu très carbonaté. Wüthrich (1960; 1961) avance la même hypothèse pour expliquer l'absence d'espèces planctoniques dans les sédiments du lac de Neuchâtel qu'elle a étudiés. La réalité de la dissolution des frustules a par ailleurs été clairement mise en évidence dans les études de Straub (Schwalb, 1992; Straub, 1993). Le nombre de diatomées recensées diminuant avec l'augmentation de la teneur en carbonates du sédiment et l'état général des frustules étant dans le même temps de plus en plus dégradé. Il est également connu qu'à un pH supérieur à 8 accompagné d'une alcalinité élevée, la possibilité d'une augmentation du taux de dissolution des frustules existe, à la fois dans la colonne d'eau et dans le sédiment (Parker et al., 1978; Parker and Edgington, 1976).

Le second épisode regroupe les intervalles L2 et L1. 63 espèces sont recensées (18 pélagiques, 45 littorales ou benthiques). Le sédiment est nettement plus riche en restes de diatomées (10000-40000 frustules par milligramme de sédiment). Certains taxons sont indicateurs d'un milieu eutrophe; ce sont en ce qui concerne l'intervalle L2, *Aulacoseira islandica subsp. helvetica*, *Fragilaria crotonensis*, *Stephanodiscus minutulus* et *Stephanodiscus neoastraea*, ces mêmes espèces étant présentes dans l'intervalle L1, en plus d'autres indicateurs de milieux eutrophes, tels que *Stephanodiscus tenuis*, *Aulacoseira granulata* et *Cyclotella comensis*. Il est à noter que 13 taxons présents dans les niveaux inférieurs ne se retrouvent pas dans les intervalles L2 et L1.

5.12.5. Isotopes stables du carbone et de l'oxygène

5.12.5.1. Introduction

Les analyses des isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$) sur sédiments lacustres sont utilisées depuis les années 1970 dans la reconstitution des conditions paléoenvironnementales et plus particulièrement des conditions paléoclimatiques (Fritz et al., 1975; Fritz and Poplawski, 1974; Stuiver, 1970).

La composition isotopique de l'oxygène des carbonates endogéniques est déterminée par la température lors de la précipitation et par la composition de l'eau environnante. Dans les sites de grande profondeur des lacs de la zone tempérée, le rapport $\delta^{18}\text{O}$ d'organismes benthiques comme les ostracodes enregistrent avant tout les variations de composition de l'eau environnante, la température de l'eau ne variant guère (von Grafenstein et al., 1999b).

Dans la mesure où à la fois la calcite endogénique et la calcite allochtone sont analysées, il est nécessaire de tenir compte de l'influence des carbonates allochtones dans notre interprétation des signatures isotopiques.

Si la calcite précipite généralement en équilibre isotopique avec l'eau environnante, la calcite des ostracodes du genre *Candona* indique un décalage d'environ 2‰ par rapport à l'équilibre isotopique (von Grafenstein et al., 1992; 1999a).

Contrairement au réservoir pratiquement infini que constitue l'océan, la composition isotopique de l'eau d'un lac peut subir de profondes modifications sous l'effet de changements au niveau de:

- la composition des précipitations (sous l'effet de la température notamment)
- l'hydrologie du bassin d'alimentation (modifications des sources d'apports liquides)
- du bilan hydrologique (rapport précipitation/évaporation notamment).

Le rapport $\delta^{13}\text{C}$ est quant à lui généralement interprété en terme de paléoproduktivité, les valeurs isotopiques du carbone inorganique dissous (DIC: dissolved inorganic carbon) étant influencées par le choix préférentiel vis-à-vis de ^{12}C par le phytoplancton lors de la photosynthèse (Aravena et al., 1992; Dean and Stuiver, 1993; McKenzie, 1985; Oana and Deevey, 1960).

Dans plusieurs lacs européens et nord-américains, une tendance récente vers des valeurs plus négatives du rapport $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates totaux est documentée (Chondrogianni, 1992; Fronval et al., 1995; McKenzie and Hollander, 1993; Nicssen, 1987; Schelske and Hodell, 1991). Une correspondance entre cette tendance et l'augmentation de l'eutrophisation au cours des dernières décennies apparaît dans l'enregistrement sédimentaire de ces lacs. La double analyse des isotopes de l'oxygène des carbonates totaux et des valves d'ostracodes permettra de vérifier si cette tendance est due ou non à une modification de la composition isotopique de l'eau du lac. Une étude récente de Fronval et al. (1995) a proposé une précipitation en déséquilibre de la calcite endogénique pour expliquer cette tendance vers des valeurs plus négatives.

Les résultats des analyses des isotopes stables du carbone et de l'oxygène sur carbonates totaux et sur valves d'ostracodes ont fait l'objet d'une publication (Filippi et al., 1999). En Figure 5.30., nous présentons les résultats reproduits dans cet article. Ils feront l'objet d'une discussion au paragraphe 5.12.6.

5.12.5.2. Résultats

Les valeurs du rapport $\delta^{18}\text{O}$ varient entre -7.7‰ et -9.2‰ en ce qui concerne les carbonates totaux et entre -3.1‰ et -4.5‰ pour les valves d'ostracodes. Des *Candona*, juvéniles et adultes, ont été sélectionnées et entre 10 et 20 valves ont été analysées par échantillon. Une tendance vers des valeurs plus négatives apparaît dans les profils du $\delta^{18}\text{O}$ entre 40 et 30cm; elle est de l'ordre de 0.3‰ pour les carbonates totaux (moyenne -8.08‰ entre 81 et 35cm; -8.39‰ entre 35 et 9cm) et de l'ordre de 0.7‰ pour les ostracodes (moyenne -3.40‰ entre 81 et 35cm; -4.10‰ entre 35 et 0cm). Une seconde tendance vers des valeurs plus négatives se dessine à partir de 9cm en ce qui concerne les carbonates totaux. Elle est de l'ordre de 0.6‰ (moyenne -9.02‰ entre 9 et 0cm). Les valeurs des ostracodes augmentent légèrement dans le même temps (env. +0.3‰).

Les valeurs du rapport $\delta^{13}\text{C}$ sont comprises entre -3.1‰ et -4.8‰ pour les carbonates totaux et entre -9.9‰ et -8.0‰ pour les ostracodes. Les deux profils laissent apparaître des tendances parallèles, excepté dans la partie sommitale de la carotte (intervalle L1 principalement), les variations des valeurs des ostracodes étant toutefois d'amplitude légèrement plus élevée que celles des carbonates. L'évolution des profils est caractérisée par deux tendances principales; une première tendance vers des valeurs plus positives de l'ordre de 1.5-2.0‰ se place entre 81 et 40cm; la seconde, de l'ordre de 1.0‰ vers des valeurs plus négatives, apparaît entre 40 et 10cm environ. La partie supérieure du profil des ostracodes laisse apparaître une évolution spécifique, avec une diminution à la transition L3-L2 et une forte augmentation des valeurs à la transition L2-L1.

L'évolution du rapport $\delta^{13}\text{C}$ est fortement corrélée à celle du rapport $\delta^{18}\text{O}$ en ce qui concerne les carbonates totaux ($r^2=0.87$), si l'on excepte la transition L5-L4, où le rapport $\delta^{13}\text{C}$ évolue plus fortement vers des valeurs plus positives par rapport à $\delta^{18}\text{O}$. Une tendance à la covariation existe également en ce qui concerne les ostracodes pour la partie centrale de la carotte ($r^2=0.68$), la transition L5-L4 étant marquée par une évolution semblable à celle observée pour les carbonates totaux et l'intervalle L1 s'écartant également de cette tendance à la corrélation positive.

La Figure 5.30.C) laisse apparaître une tendance à la covariation entre les rapports $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates totaux et des ostracodes, la partie supérieure de la carotte exceptée. La même remarque est valable en ce qui concerne les rapports $\delta^{13}\text{C}$.

5.12.6. Discussion

Modification de la couverture végétale

Les tendances majeures de l'histoire de la végétation Holocène ainsi que l'influence de l'homme sur cette végétation sont relativement bien connues en ce qui concerne la Suisse. De nombreuses études rendent compte d'un impact anthropique sur la végétation sur le plateau et dans le Jura et les Alpes, souvent depuis l'époque néolithique, et qui ont eu lieu par pulsations successives (Ammann, 1988; De Beaulieu et al., 1994; Hadorn, 1992; Hadorn, 1994; Lotter, 1990; Richard, 1994; Richoz et al., 1994; Richoz and Gaillard, 1989). Comme nous l'avons déjà mentionné, le diagramme de la carotte C19e (Fig.5.23.) présente un taux élevé de pollens à ballonets, comparé à d'autres colonnes sédimentaires provenant du lac de Neuchâtel (Hadorn, in prep.; Matthey, 1971; Richoz and Gaillard, 1989; Schwalb, 1992). Cette particularité a été attribuée (cf. 4.4.10. et 5.12.2) à une distribution particulière des pollens par les courants du lac ou à une remise en suspension préférentielle des pollens à ballonets avec un possible transfert latéral de ces pollens depuis le plateau lacustre.

Deux phases principales d'impact humain sur la végétation sont discernables. La première phase (LPAZ 1b) correspond à la transition L5-L4, et se caractérise par la diminution du rapport AP/NAP ainsi que du taux d'*Abies*. Elle se situe probablement au niveau de la fin du Haut Moyen Age, vers 600-700AD, et correspondrait donc à une période de recolonisation du milieu par l'homme suite à la période des migrations des peuples qui a marqué la chute de l'Empire romain, en 476AD. La zone pollinique 1a avec le taux le plus faible de NAP de tout le profil reflète en effet probablement la végétation du Haut Moyen Age. Les découvertes archéologiques qui remontent à cette période sont faibles et une reforestation partielle du milieu est attestée (Egloff, 1989; Hadorn, 1994). La régression de la représentation d'*Abies* pourrait indiquer une colonisation de la chaîne jurassienne, le sapin blanc étant rare au-dessous de 800-900m, hormis parmi les plantations récentes. Si aucune évidence archéologique ou historique ne vient étayer cette hypothèse, Schoellammer (1997) note la représentation de *Cerealia* dès l'Atlantique ancien sur le site du Locle et une anthropisation marquée du Bronze final à l'époque moderne, accompagnée d'une perturbation indiscutable des hêtraies-sapinières. Etant donné qu'une recolonisation du milieu par l'homme est attestée dans la zone de basse altitude à la même époque (Hadorn, 1994; Hadorn, in prep.), il est possible qu'une anthropisation générale du milieu ait eu lieu, et qui n'aurait pas épargné la chaîne du Jura. Cette hypothèse est comme nous le verrons confirmée par les autres résultats à notre disposition.

La seconde phase importante d'impact anthropique sur le couvert végétal se situe au niveau de la transition L4-L3 et se poursuit au-delà, au sein de l'intervalle L3. Elle se caractérise par une augmentation du rapport AP/NAP concomitante à la diminution de la teneur en carbone inorganique et par la très forte régression de *Picea* dont la représentation passe de 30% environ dans l'intervalle L4 à moins de 5% entre 33 et 25cm. L'augmentation de la représentation de *Juniperus*, concordante à celle de la carotte courte LN01 (Hadorn, in prep.), est attribuable à l'existence de pâturages boisés (Richoz and Gaillard, 1989; Rösch, 1983). La propagation de cet arbuste est en effet favorisée suite à la surexploitation des pâturages boisés par le fait que le bétail l'évite en raison de ses feuilles acérées (Hadorn, 1992; 1994). Une recolonisation partielle des zones ouvertes par les espèces pionnières (*Corylus*, *Alnus*, *Betula*, *Fraxinus*, *Salix*) ne s'observe pas dans la carotte C19c mais apparaît par contre très nettement dans la carotte courte LN01 (Hadorn, in prep.) en correspondance avec la partie inférieure de la zone pollinique 2a de C19c. Dans l'enregistrement sédimentaire du lac d'Annecy, l'augmentation des taux de *Juniperus* et de *Pinus* au Moyen Age est également interprétée comme reflétant une régénération locale de zones récemment ouvertes (Higgitt et al., 1991). Dans le cas de C19c, les taux élevés de *Pinus* lors de la phase 2a sont plutôt attribuables à une sur-représentation statistique due à la très forte régression de *Picea* ou à une dispersion facilitée des pollens de *Pinus* suite à l'ouverture accrue du paysage.

Historiquement, cette phase de déforestation est bien connue. Elle peut être reliée à une accélération de la colonisation de la région des Montagnes neuchâtelaises dès le 13^e siècle. Les 12^e et 13^e siècles sont marqués dans le comté de Neuchâtel comme ailleurs en Europe par un accroissement de la population qui a connu son apogée au début du 14^e et a été brutalement arrêté par la peste de 1349/1350 (Scheurer, 1989b). Du Val-de-Ruz, du Val-de-Travers et de Rochefort, les paysans défrichent la forêt et exploitent des prés à "La Chaz de Fons" (future La Chaux-de-Fonds), dans la vallée de La Brévine et dans la région de La Tourne (Scheurer, 1989b). Ce séjour en montagne, d'abord temporaire, devient permanent avec l'apparition à la fin du 13^e et au début du 14^e de localités situées au-dessus de 800m et dont le nom est précédé par l'article défini: La Sagne, Le Locle, Les Vieux-Prés, Le Cerneux-Péquignot, La Chaux-du-Milieu, ces deux dernières localités ayant été fondées par des habitants du Val-de-Morteau (Scheurer, 1989b). Interrompus suite à l'épidémie de peste, les défrichements ont repris dès 1430 et se sont poursuivis sans interruption jusqu'au milieu du 16^e siècle (Scheurer, 1989a). La déforestation dut modifier profondément le paysage des Montagnes neuchâtelaises; les documents du début du 16^e où il est question de forêts transformées en prés sont en effet très abondants (Scheurer, 1989a). La réaugmentation des taux de *Picea* à partir de 22cm pourrait alors être liée à la déprise sur les forêts des Montagnes neuchâtelaises dès la fin du 16^e siècle.

La forte régression de la représentation de *Picea* et celle plus limitée d'*Abies* sont donc clairement liées à la colonisation de la haute chaîne du Jura. L'augmentation des taux de *Juniperus* ne fait que confirmer l'exploitation de pâturages boisés dans la chaîne jurassienne. Il semble donc se confirmer que le diagramme pollinique de la carotte C19c caractérise l'évolution de la végétation des altitudes moyennes à supérieures de la chaîne jurassienne.

Relations entre la modification de la couverture végétale, la composition du sédiment et les assemblages fossiles d'ostracodes et de diatomées

A partir de son étude de la sédimentation dans les lacs de Zürich et de Zoug, Kelts (1978) a suggéré que le Petit Age Glaciaire était marqué dans l'enregistrement sédimentaire par un accroissement des apports détritiques. Les sédiments de plusieurs lacs périalpins laissent effectivement apparaître une diminution du contenu en carbonates durant le Moyen Age. Outre les lacs de Zürich et de Zoug, les lacs suivants peuvent être cités: lac de Morat (Davaud, 1976; Hadorn, 1987), lac d'Annecy (Higgitt et al., 1991), Grabensee (Schneider et al., 1990), Attersee (Behbehani, 1987; Schneider et al., 1990). Il y a actuellement une

concordance d'opinions pour affirmer que l'impact humain sur l'environnement a été la cause principale de la modification de la composition du sédiment, du moins en ce qui concerne le Subatlantique.

Les deux modifications majeures de la lithologie aux transitions L5-L4 et L4-L3 sont marquées par de fortes diminutions de la teneur en carbone total de respectivement 25% et 20% environ. Sans une résolution fine de l'échelle chronologique, il est toutefois malheureusement impossible de déterminer si ces variations de composition sont dues à une augmentation des apports détritiques.

Les taux d'accumulation ont été reconstitués sur la carotte LN01 (Fig.5.31.A) grâce aux datations de Schwalb (1992) et à la palynostratigraphie de Hadorn (Hadorn, in prep.). La corrélation de LN01 avec la carotte C37 permet de prendre en compte les taux d'accumulation récente. Le taux d'accumulation totale ainsi reconstitué montre une légère augmentation du Subboréal au Subatlantique. Le taux d'accumulation le plus faible se situe au 19^e siècle (C37; cf. Fig.5.18.), ce qui paraît étonnant. Le taux d'accumulation de carbonates laisse apparaître des variations mesurées, avec un maxima évalué à 0.085-0.100 [g/cm²*an] durant le Subatlantique ancien. Le taux d'accumulation de résidu insoluble montre les variations les plus fortes; il passe de 0.008-0.034 [g/cm²*an] au Subboréal à 0.022-0.028 [g/cm²*an] au Subatlantique ancien et à 0.041-0.050 [g/cm²*an] au Subatlantique récent. La reconstitution de ce taux pour le Subboréal est compliquée par le fait que l'Aar était un affluent du lac de Neuchâtel durant la première moitié de cette période (Schwalb, 1992; Schwalb et al., 1994). En soustrayant la part du flux de résidu insoluble attribuable à l'Aar, le taux d'accumulation de résidu insoluble peut être évalué à 0.008-0.019 [g/cm²*an] au Subboréal. Cette évaluation a été réalisée en multipliant le taux d'accumulation totale par le contenu en résidu insoluble du sédiment durant la période du Subboréal où l'Aar n'as pas coulé dans le lac de Neuchâtel.

L'augmentation du taux d'accumulation de résidu insoluble du Subboréal au Subatlantique récent peut être attribuée à un accroissement de l'impact anthropique sur la végétation avec pour corollaire une érosion accrue des sols. Les modifications modérées du climat durant cette période ne sont en effet probablement pas susceptibles d'avoir provoqué de tels changements au niveau de l'érosion des sols.

La Figure 5.31.B) présente différentes hypothèses d'évolution des taux d'accumulation de carbonates et de résidu insoluble:

- 1) Hypothèse d'un taux d'accumulation de carbonates constant;
- 2) Hypothèse d'un taux d'accumulation totale constant;
- 3) Hypothèse d'un taux d'accumulation de résidu insoluble constant.

Ces différentes hypothèses visent simplement à évaluer quelle a été l'évolution la plus probable du taux d'accumulation de résidu insoluble au cours du Subatlantique récent.

En postulant que le taux d'accumulation de carbonates s'est maintenu constant, le taux d'accumulation de résidu insoluble évolue alors de 0.015 [g/cm²*an] dans l'intervalle L5 à 0.05 [g/cm²*an] à la base de L4 et à 0.08 [g/cm²*an] à la base de L3, ce qui impliquerait une multiplication par cinq des apports détritiques de L5 à la base de L3, voire par 6 à 7 en tenant compte de la part carbonatée des apports détritiques. Cette augmentation se réduit à un facteur trois (L5: 0.02 [g/cm²*an]; base de L3: 0.06 [g/cm²*an]) si on postule que le taux d'accumulation totale est resté constant (Fig.5.31.B; colonne 2). Dans le même temps, la précipitation de calcite endogénique aurait dû diminuer d'environ 40%, passant de 0.095 [g/cm²*an] à 0.055 [g/cm²*an]. Le dernier cas de figure postule que le taux d'accumulation de résidu insoluble est resté constant. Dans ce cas, la précipitation de calcite endogénique a dû diminuer d'un facteur cinq entre l'intervalle L5 et la base de L3 (Fig.5.31.B; colonne 4) ou d'un facteur 2.5 si on tient compte de la part allochtone des carbonates (colonne 4: profil hachuré).

D'après les résultats des isotopes stables, il n'y a aucune raison de penser que des péjorations climatiques aient pu provoquer une diminution si sensible de précipitation carbonatée dans le lac. Une diminution qui serait due à une plus faible productivité, donc à un plus faible apport de sels nutritifs au lac, est également improbable dans le contexte des déforestations attestées. L'hypothèse d'un taux d'accumulation de résidu insoluble constant est donc hautement improbable. L'hypothèse la plus acceptable est que les apports détritiques ont augmenté suite aux déforestations, un facteur trois entre L5 et la base de L3 pouvant être considéré comme minimal.

Avec l'augmentation de l'eutrophisation au cours du 20^e siècle, la composition du sédiment a évolué dans de nombreux lacs suisses, devenant plus carbonatée, ce qui est interprété comme étant dû à une augmentation de la précipitation de calcite en parallèle avec celle de la productivité (Kelts and Hsü, 1978; McKenzie and Hollander, 1993; Niessen and Sturm, 1987). Dans le lac de Neuchâtel, le taux de carbonates augmente également jusqu'au sommet de L2 puis diminue ensuite légèrement (Fig.5.32.), ce que compense en partie seulement l'augmentation de la teneur en matière organique.

Les taux d'accumulation récente ont été reconstitués sur la carotte courte C37 (Fig.5.19.). L'augmentation du taux d'accumulation totale de 0.045 à 0.07 [g/cm²*an] est datée approximativement 1880-1900. Elle pourrait avoir suivi la première correction des eaux du Jura, qui eut pour conséquence un abaissement de 2.75m du niveau du lac entre 1875 et 1880 (travaux d'ingénierie majeurs: détournement de l'Aar dans le lac de Bièvre, approfondissement et canalisation de la Thielle (liaison Neuchâtel-Bienne) et de la Broye (liaison Neuchâtel-Morat)). Un recul annuel de la rive SE du lac de 5 à 6m s'ensuivit durant la période 1880-1893 (Huber, 1993; Laboratoire de Recherches Hydrauliques, 1990). La quantité de matériel ainsi remobilisé est importante

(Laboratoire de Recherches Hydrauliques, 1990), ce qui est susceptible d'avoir augmenté le taux d'accumulation de manière générale dans le lac. Une augmentation de la productivité couplée à une augmentation de la précipitation carbonatée pourrait également avoir constitué un facteur responsable de cette augmentation, le niveau en question correspondant à peu près à l'apparition de taxons indicateurs de milieux eutrophes dans la carotte C19c. En outre, Fuhrmann (1900) mentionne la présence d'*Oscillatoria rubescens* et de *Fragilaria crotonensis*, deux indicateurs de milieux eutrophes, en 1897-98 dans le lac de Neuchâtel. La seconde augmentation du taux d'accumulation de 0.07 à 0.121[g/cm²*an], datée approximativement 1940-1950, est probablement attribuable à l'influence de l'accélération de l'eutrophisation enregistrée dans les années 50 et 60 (Dubois and Schetty, 1977; Solberger, 1974). Une régression de la teneur en carbone inorganique étant enregistrée au cours de l'intervalle L1, l'augmentation supposée de la précipitation carbonatée a dû être compensée par un accroissement des apports détritiques au moins aussi important. Les pratiques culturales intensives de ce siècle pourraient expliquer l'accroissement du taux d'accumulation de résidu insoluble de 0.012[g/cm²*an] entre 25 et 20cm à 0.034[g/cm²*an] entre 15 et 0cm. Ajoutons tout de même que la signification de ces deux augmentations du taux d'accumulation récente est relativisée par la valeur moyenne du taux d'accumulation au Suballantique récent, équivalente à 0.105-0.127[g/cm²*an]. La reconstitution des taux d'accumulation récente devrait en toute rigueur être vérifiée sur d'autres carottes courtes.

La correspondance entre les phases de modifications du couvert végétal et les changements lithologiques apparaît de manière évidente (Fig.5.23.) et ceci aussi bien en ce qui concerne l'analyse de la carotte C19c que de celle de la carotte courte LN01 (Hadorn, in prop.). Il existe une tendance à la corrélation inverse entre la teneur en carbone inorganique et le pourcentage de pollens arboréens (Fig.5.33.: $r^2=0.45$), ce qui se confirme dans la carotte courte LN01, la teneur en carbone total étant dans ce cas considérée ($r^2=0.59$). Le pourcentage de pollens non arboréens reflétant dans une certaine mesure l'ouverture du milieu, cette tendance à la corrélation tend à confirmer l'existence d'une relation de causalité entre les phases de défrichement et une composition moins carbonatée du sédiment. Le corollaire est qu'une augmentation de l'érosion des sols a dû avoir lieu à l'échelle du bassin versant lors des deux phases de déforestation principales. En toute rigueur, ce raisonnement devrait toutefois se baser sur les flux de résidu insoluble, flux qui ne peuvent malheureusement être reconstitués de manière précise à cette échelle temporelle.

La relation entre le rapport C/N (carbone organique/azote total) et la teneur en carbone inorganique est présentée à la Figure 5.34. La relation entre ces deux mesures est faiblement positive si l'on considère la carotte entière ($r^2=0.20$), mais devient fortement positive lorsque l'on exclut les intervalles L2 et L1 ($r^2=0.63$). Il est possible que l'augmentation du rapport C/N entre la surface et 10cm environ soit due à une minéralisation plus aisée de l'azote par rapport au carbone, processus qui est connu (Kemp and Mudrochova, 1972; Seki et al., 1968), et une telle évolution du rapport C/N avec la profondeur ayant déjà été observée et interprétée de cette façon (Kemp et al., 1977; Wakefield and O'Sullivan, 1996).

Le contenu en azote inorganique a été analysé afin de vérifier si les niveaux de faible teneur en carbone inorganique correspondants à des valeurs basses du rapport C/N pouvaient être reliées à de l'azote inorganique lié aux argiles (NH₃-N et NO₃-N). Les résultats présentés à la Figure 5.34. indiquent une teneur en azote inorganique comprise entre 30 et 130µg/g, ne montrant aucun lien avec le contenu en carbone inorganique ($r^2=0.08$, r négatif). Ces résultats ne modifient pas de manière significative le rapport C/N. Notons encore que l'azote inorganique est surtout constitué d'ammonium, la teneur en nitrate étant plus faible, ce qui a déjà été observé dans d'autres lacs (Kemp et al., 1977).

Cette tendance à la corrélation positive entre C/N et carbone inorganique est étonnante car nous nous attendrions au résultat inverse. Dans les grands lacs américains, des valeurs de C/N comprises entre 7 et 9 indiquent que le phytoplancton est la source majeure de la matière organique (Kemp et al., 1977). Dans une étude de la matière organique marine, Bordovskiy (1965) a observé des valeurs de C/N de 5.9 en moyenne pour le phytoplancton et de 6.3 pour le zooplancton, ce qui est assez proche de l'analyse de notre unique échantillon (C/N=5.2). Le rapport C/N des macrophytes est quant à lui généralement compris entre 14 et 20 (Bordovskiy, 1965; Kemp et al., 1977). Dans le cas du lac de Neuchâtel, nous avons déterminé une valeur moyenne de 12.2 pour les principaux affluents du lac (Tab.4.2.), alors que le matériel récolté par pièges à sédiments laisse apparaître un rapport C/N compris entre 6 et 16, avec une moyenne de 9.2. Le sédiment de surface possède un rapport C/N moyen de 10.4 (Annexe 5.6.). Ces valeurs de pièges et de sédiment de surface sont tout à fait comparables à celles observées dans le lac Léman (7.9-9.8 pour les pièges, 10.2 en moyenne pour le sédiment de surface)(Thomas et al., 1991).

Les restes de macrophytes étant très rares dans la carotte C19c, la possibilité d'apports différentiels de matière organique provenant de macrophytes est à rejeter. L'accroissement postulé des apports détritiques pourrait avoir été compensé par une augmentation encore plus importante de la production dans le lac. Cependant, un calcul simple de bilan permet de conclure que le rapport C/N ne peut diminuer de cette manière sans qu'une augmentation de la teneur en carbone organique du sédiment ait lieu, ce qui n'est pas observé.

Le rapport C/N des apports détritiques peut lui aussi avoir été sujet à des variations. Le rapport C/N d'un sol sous prairie est généralement de l'ordre de 11-12, voire jusqu'à 15 pour les prairies d'altitude riches en

graminées, de 12-16 sous les hêtraies, jusqu'à 20 sous forêt d'épicéa, et jusqu'à 30-40 dans les tourbières (Gobat, comm.pers.). On pourrait donc imaginer que le C/N des apports détritiques ait diminué suite aux déforestations. Pourtant deux faits rendent cette hypothèse discutable; premièrement, les valeurs élevées de C/N à la transition L3-L2 sont difficilement explicables dans ce contexte; en second lieu, la proportion de matière organique d'origine allochtone est relativement faible dans le lac de Neuchâtel (Beck, 1987; Pittet, 1990). Dans d'autres lacs suisses (St.Moritz et Greifensee), cette proportion a été estimée inférieure à 5% (Ariztegui and McKenzie, 1995).

Une autre hypothèse consiste à faire intervenir une minéralisation différentielle de la matière organique au cours de la diagenèse, dépendante du taux de sédimentation. Des valeurs de C/N de 14.0 en moyenne pour la carotte C19c ne peuvent en effet s'expliquer en considérant que les apports en matière organique allochtone sont d'importance mineure et que le phytoplancton possède des valeurs moyennes de C/N de l'ordre de 6 (Bordovskiy, 1965). Une influence de la minéralisation sur les valeurs de C/N est déjà sensible dans les pièges, les valeurs des pièges étant en moyenne d'environ une unité inférieures à celles du sédiment de surface et d'autre part bien supérieures à celles du phytoplancton. Yakahashi & Saigol (1982, in: Golterman, 1984) font la même observation et ont estimé d'après une modélisation des processus biologiques et chimiques que la minéralisation de l'azote particulaire atteignait 8.6% par jour. Jones et al. (1982, in: Golterman, 1984) observent également une augmentation du rapport C/N du seston au cours de sa sédimentation et sa poursuite après déposition. A noter que Golterman (1984) a estimé qu'environ 80% des cellules algues sont aisément dégradables. Dans le Lungemsee, il a été estimé qu'environ 7% seulement de la matière organique produite dans l'épilimnion trouvait une sédimentation définitive (Bossard & Gächter, 1981, in: Golterman, 1984). Il y a dénitrification du sédiment lors de la diagenèse avec départ de N₂ et/ou de NH₄⁺, seule la matière organique réfractaire étant préservée (Golterman, 1984), cette dénitrification devenant de plus en plus difficile à mesure que le rapport C/N du sédiment augmente. Il est également largement reconnu que les formes les moins réactives du carbone deviennent progressivement dominantes avec la progression de l'enfouissement (Meyers and Ishiwatari, 1993).

Le site C37 étant plus proche des sources d'apports allochtones que le site C19, les valeurs de C/N devraient être plus élevées dans le premier que dans le second site. Or le contraire s'observe, le rapport C/N étant en moyenne équivalent à 11.3 dans la carotte C37, contre 12.8 dans la partie correspondante de C19c (Fig.5.34.E). Le taux de sédimentation de C37 étant plus élevé que celui de C19c, il se pourrait que la minéralisation de la matière organique soit dépendante du taux de sédimentation, ce qui confirmerait des taux d'accumulation plus élevés lors des périodes de faible teneur en carbone inorganique, en correspondance avec les phases de déforestation. A teneur du sédiment en carbone organique égale, un taux d'accumulation élevé implique également une production primaire plus élevée. Il est donc possible que de la matière organique non réfractaire soit partiellement préservée en période de fort taux d'accumulation et qu'en période de taux faible seule la matière organique réfractaire soit préservée sans que pour autant la teneur en matière organique change sensiblement. L'examen microscopique de la matière organique serait nécessaire afin de vérifier cette hypothèse.

En conclusion, l'hypothèse la plus probable pour expliquer la variation du rapport C/N relève d'une transformation différentielle de la matière organique au cours du temps, probablement dépendante du taux de sédimentation. Nous suggérons donc que les taux d'accumulation ont été plus élevés en période de faible teneur en carbone inorganique et que par conséquent la production de matière organique autochtone a probablement légèrement augmenté sous l'effet d'apports plus élevés en sels nutritifs à la suite des déforestations qui ont affecté le bassin d'alimentation du lac de Neuchâtel.

En ce qui concerne les assemblages fossiles d'ostracodes, la représentation de *Limnocythere* et de *Leucocythere* évolue de manière opposée à celle de *Cypria* et d'*Ilyocypris* dans la carotte C19c (Fig.5.27.). Il existe d'autre part une certaine tendance à la corrélation négative entre le nombre et le pourcentage de valves de *Cypria* et d'*Ilyocypris* et la teneur en carbone inorganique, et une tendance à la corrélation positive entre le pourcentage de *-Cythere* et la teneur en carbone inorganique (Tab.5.2.).

	% Cypria	nb Cypria	% Ilyo	nb Ilyo	% -Cythere	nb -Cythere	Cmin
% Cypria	1.00	0.81	0.26	0.27	-0.56	-0.14	-0.51
nb Cypria		1.00	0.07	0.33	-0.10	0.38	-0.47
% Ilyo			1.00	0.88	-0.50	-0.45	-0.44
nb Ilyo				1.00	-0.24	-0.08	-0.47
% -Cythere					1.00	0.83	0.55
nb -Cythere						1.00	0.18
Cmin							1.00

Tab.5.2. Matrice de corrélation des données des ostracodes (>63µm) et de teneur en carbone inorganique de la carotte C19c; en gras les valeurs supérieures à 10.40

Comme nous l'avons déjà mentionné, *Candona neglecta*, *Ilyocypris bradyi* et *Cypria ophthalmica* sont des espèces très tolérantes (Geiger, comm.pers.; Löffler, 1986; Nüchterlein, 1969; Vesper, 1975), alors que *Leuconocythere mirabilis* et *Limnocythere sanctipatricii* sont très sensibles à l'augmentation de l'eutrophisation (Geiger, comm.pers.; Scharf, comm.pers.; Schwalb, 1992). Les comportements opposés de *Leuco-* et *Limnocythere* d'un côté et de *Cypria ophthalmica* et *Ilyocypris bradyi* de l'autre pourraient impliquer une augmentation de l'eutrophisation et de la productivité aux transitions L5-L4, L4-L3 ainsi qu'au cours des intervalles L2 et L1. Dans ce contexte, on peut également noter la forte augmentation des restes de zooplancton observable à la transition L5-L4 (Fig.5.28.). Aucun comptage n'a cependant été effectué.

La progression de la représentation de *Cytherissa lacustris* au niveau de l'intervalle L1 est en apparence contradiction avec la récente augmentation de l'eutrophisation. Cette espèce a en effet récemment disparu de plusieurs lacs, notamment du lac de Constance et de nombreux endroits du Mondsee (Danielopol, 1990; Löffler, 1990). Les eaux profondes du lac de Neuchâtel sont toutefois restées bien oxygénées même au plus fort de l'eutrophisation durant les années 1970, et ceci également durant l'été (cf.Fig.3.3.). Le développement de *Cytherissa* pourrait alors avoir été favorisé par une nourriture plus abondante, alors que *Leuco-* et *Limnocythere* sont plus sensibles à l'eutrophisation (Scharf, comm.pers.).

L'hypothèse d'une augmentation de la productivité au passage L5-L4 n'est que partiellement confirmée par l'analyse de la carotte LN01 (Fig.5.28.). Si une augmentation des restes de zooplancton est observable, seules *Leuco-* et *Limnocythere* montrent une évolution semblable à celle de C19c, alors que la représentation d'*Ilyocypris* laisse apparaître une forte diminution. Il est possible que les probables perturbations de l'écosystème à l'intervalle L5-L4 modifient les conditions de compétition entre les espèces ou que d'autres facteurs interviennent. La forte représentation de *Cypria* est en légère augmentation à la transition L5-L4, mais sans commune mesure avec l'évolution observée dans C19c ni avec sa représentation dans la carotte LN05 (Schwalb, 1992), où seules une quinzaine de valves ont été inventoriées. Ce dernier point est d'autant plus étonnant qu'il s'agit d'une espèce planctonique. Nous n'avons pas d'explication plausible de la cause de ce fait, si ce n'est la possibilité de la distribution particulière des valves de *Cypria* par les courants lacustres. Löffler (1969) a observé que la distribution de *Cypria ophthalmica* dans les sédiments du lac de Constance se concentre dans la zone profonde du lac, et l'interprète comme étant dû à une distribution particulière par les courants lacustres.

Les résultats de la carotte LN01 relativisent donc quelque peu les conclusions tirées de l'analyse de C19c et montrent clairement que la répartition spatiale des espèces d'ostracodes est loin d'être uniforme, et ce même dans la zone profonde.

Les assemblages de diatomées laissent apparaître une eutrophisation croissante du lac dès l'intervalle L2, avec l'apparition à 9cm de profondeur de *Aulacoseira islandica subsp. helvetica*, *Fragilaria crotonensis*, *Stephanodiscus minutulus* et *Stephanodiscus neoastraea*. Fuhrmann (1900) mentionne la présence de *Fragilaria crotonensis* dans le lac de Neuchâtel en 1897-1898 déjà, mais ne cite pas les autres espèces ci-dessus, tandis que Wüthrich (1965) mentionne la présence d'*Aulacoseira islandica subsp. helvetica* et de *Stephanodiscus astraea* dès 1959. D'autres indicateurs de milieux eutrophes apparaissent dans l'intervalle L1, tels que *Stephanodiscus tenuis*, *Aulacoseira granulata* et *Cyclotella comensis*. Seule cette dernière espèce est mentionnée par Wüthrich (1965) pour les années 1959-62.

Le début de cette phase récente d'eutrophisation croissante marquée dès l'intervalle L2 est difficile à dater mais remonterait d'après les corrélations avec C37 au 19^e siècle déjà, sans qu'il soit possible de préciser.

L'absence d'indicateurs d'eutrophie dans les intervalles L3 à L5 pourrait être interprétée comme étant due à une stabilité réelle du niveau trophique du lac de Neuchâtel antérieurement au 19^e siècle. Toutefois, comme nous l'avons déjà mentionné, il est probable qu'une dissolution partielle et sélective des frustules ait eu lieu. Cette hypothèse est confirmée par la comparaison des résultats des analyses de la carotte C19c avec ceux de la carotte LN03, analysée par F.Straub (1993). En effet, la carotte LN03 laisse apparaître des concentrations de frustules 10 à 100x plus élevées que dans la carotte C19c (Fig.5.35.). D'autre part cette carotte laisse apparaître une augmentation des concentrations au passage L5-L4 ainsi et surtout au passage L4-L3, avec une augmentation des indicateurs d'eutrophie (Fig.5.35.), tels que *Aulacoseira islandica subsp. helvetica* et *Stephanodiscus sp.* (Straub, 1993).

Ceci confirmerait donc que la carotte C19c a été sujette à une plus forte dissolution des diatomées pour une raison qui est peut-être à relier au taux d'accumulation plus faible dans ce site par rapport à celui de LN03 et que les transitions L5-L4 ont bien été marquées par une augmentation du niveau trophique.

Informations des isotopes stables du carbone et de l'oxygène

Les résultats de l'analyse des isotopes stables du carbone et de l'oxygène sont discutés en détail dans l'article de Filippi et al. (1999). Les facteurs qui influencent les rapports $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ sont discutés sommairement en 5.12.5. et de manière très détaillée dans la thèse de Filippi (1996). Notre objet ici est de discuter les principales hypothèses qui ont été émises dans cet article.

$\delta^{13}\text{C}$

L'évolution du $\delta^{13}\text{C}$ à la transition L5-L4 laisse apparaître une tendance vers des valeurs plus positives de l'ordre de 1-1.5‰ et ce aussi bien au niveau des valves d'ostracodes que des carbonates totaux. La figure 5.36.A. montre que l'évolution générale du rapport $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates totaux ne peut être expliquée par une influence des carbonates allochtones; en effet, même en postulant que les apports détritiques ont la composition de l'Areuse, affluent qui apporte les sédiments les plus carbonatés, l'évolution générale du $\delta^{13}\text{C}$ est maintenue (Fig. 5.36.D).

Il semblerait donc que les variations du $\delta^{13}\text{C}$ entre 80 et 20cm soient dues à des modifications de la composition isotopique globale du DIC.

A cela deux explications sont possibles et ont pu agir de concert:

- une modification de la composition globale du carbone inorganique dissous (DIC) pourrait être liée à la destruction partielle des sols suite aux défrichages. La dissolution des carbonates sans tamponnement par le sol peut en effet mener à un $\delta^{13}\text{C}$ du DIC jusqu'à -3.5‰ (Håkansson, 1985), alors que la dissolution avec un bon tamponnement mène à un $\delta^{13}\text{C}$ de l'ordre de -1‰. Le retour vers des valeurs plus négatives entre 40 et 20cm serait alors dû à une stabilisation de l'érosion des sols avec l'arrêt des défrichements massifs à la fin du Moyen Age.

- une augmentation de la productivité peut elle aussi mener à une modification de la composition moyenne du DIC de l'eau du lac, le temps de résidence moyen des eaux du lac étant relativement long (8.25ans, Service cantonal de la protection de l'environnement). Cette hypothèse est toutefois relativement improbable étant donné le manque d'évidence d'une augmentation sensible du taux d'accumulation du carbone organique et que l'évolution du $\delta^{13}\text{C}$ des ostracodes à la transition L3-L2, où les indications d'une augmentation de la productivité sont claires, montre qu'une augmentation de productivité entraîne des valeurs hypolimniques globalement plus négatives du DIC, en conformité avec le modèle classique (McKenzie, 1985).

En ce qui concerne les intervalles L2 et L1, l'évolution vers des valeurs à la base de L2 est interprétable comme étant due à l'influence d'une augmentation de productivité (augmentation de la minéralisation de la matière organique dans l'hypolimnion), alors que l'augmentation de l'ordre de 1.5‰ du $\delta^{13}\text{C}$ à la transition L2-L1 est probablement liée à une influence de la méthanogenèse, qui peut entraîner la production de CO_2 lourd, entre -5 et +15‰ (Oana and Deevey, 1960).

Quant à l'évolution du $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates totaux qui est parallèle à celle du $\delta^{18}\text{O}$, une influence d'une précipitation de la calcite en déséquilibre est probable, des valeurs très négatives de $\delta^{13}\text{C}$ ayant été enregistrées lors de notre expérimentation par pièges à sédiments (cf. paragraphe 4.4.11.).

$\delta^{18}\text{O}$

L'article de Filippi et al. (1999) montre tout d'abord clairement l'enrichissement légèrement supérieur à 2‰ (2.3-2.4‰) des valves de *Candona* par rapport à l'équilibre calculé. Un effet vital des *Candona* doit être donc postulé, ce qu'ont établi von Grafenstein et al. (Von Grafenstein, 1999a; von Grafenstein et al., 1992).

Nous avons interprété (Filippi et al., 1999) l'évolution entre 40 et 30cm de -0.3‰ pour les carbonates totaux et de -0.7‰ pour les ostracodes comme étant due à une détérioration du climat à la transition entre l'Optimum Climatique Médiéval (MWP) et le Petit Age Glaciaire (LIA). En effet, des variations de la répartition des précipitations au long de l'année, du bilan précipitation/évaporation ou de conditions hydrologiques générale du bassin versant ne sont pas documentées dans une mesure qui permettrait d'expliquer les variations observées (cf. 5.12.7.).

En ce qui concerne les carbonates totaux, il est possible de vérifier, comme dans le cas du $\delta^{13}\text{C}$, l'influence possible des carbonates allochtones. Les résultats de ces estimations sont présentés à la Figure 5.37. Les hypothèses raisonnables de teneur en calcite allochtone ne modifient pas l'allure du profil (B et C), alors que l'hypothèse extrême de contenu en calcite allochtone (D) transforme l'allure du profil en le rapprochant du profil de teneur en carbone inorganique, ce qui ne semble pas raisonnable.

Ceci nous permet de conclure que l'influence des carbonates allochtones sur l'évolution générale du profil du $\delta^{18}\text{O}$ est pratiquement négligeable.

A la Figure 5.38., nous comparons le profil du $\delta^{18}\text{O}$ des ostracodes (*Candona neglecta*: $\delta^{18}\text{O}_{\text{C.n.}}$) avec les reconstitutions des températures à Bâle pour la période 1525-1985 (Pfister, 1992) et de l'Europe centrale (Hollande, Allemagne, nord de la France, nord de la Suisse) pour la période 1270-1400 (Pfister, 1985), ainsi qu'avec la reconstitution des variations de l'extension du glacier d'Aletsch (Holzhauser, 1988).

La possibilité de considérer les variations du $\delta^{18}\text{O}_{\text{C.n.}}$ des ostracodes benthiques comme caractéristiques de la variation de la composition de l'eau locale ($\delta^{18}\text{O}_\text{L}$) est justifiée par le fait que les variations hypolimniques de température sont limitées (cf. Lister, 1988). Dans cette optique, il aurait été préférable de choisir un site plus profond et de ne sélectionner que des *Candona* juvéniles, la température de l'eau à 55m pouvant atteindre 7°C en automne (cf. Fig. 3.4.) et les stades adultes de ces espèces apparaissant justement durant cette période (von Grafenstein et al., 1999).

Une relation entre la moyenne annuelle de la température de l'air (MAAT) et le rapport $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations ($\delta^{18}\text{O}_\text{p}$) proche de 0.6‰/°C (0.58‰/°C) s'applique à l'Europe centrale (Rozanski et al., 1992;

Rozanski et al., 1993) pour les 20 dernières années environ. Von Grafenstein et al. (1996) montrent que cette relation s'applique probablement aux 200 dernières années et il n'y pas de raison de penser qu'elle a subi de profondes modifications durant tout l'Holocène. Ces auteurs montrent également que la réponse de la composition de l'eau du lac ($\delta^{18}\text{O}_L$) dépend notamment des fréquences dominantes des variations de la température et trouvent une relation $\delta^{18}\text{O}_L$ -MAAT de $0.38\text{‰}^\circ\text{C}$ dans le cas de l'Ammersee pour les 200 dernières années. En toute rigueur cette relation devrait être déterminée pour chaque lac à partir duquel on cherche à établir des variations de la température passée. Dans le cas d'un changement de $\delta^{18}\text{O}_L$ à long terme comme celui enregistré dans la carotte C19c du lac de Neuchâtel entre 40 et 30cm de profondeur, il est probable que la relation $\delta^{18}\text{O}_L$ -MAAT soit proche de celle de $\delta^{18}\text{O}_P$ -MAAT, le changement de température s'étendant sur une période de bien plus longue durée que le temps de réponse du lac.

Si l'on postule que la variation de $\delta^{18}\text{O}_L$ a répondu à la relation $\delta^{18}\text{O}_P$ -MAAT observée par Rozanski et al. (1993), soit $0.58\text{‰}^\circ\text{C}$, et qu'aucun changement hydrologique n'est intervenu, la température moyenne de l'air aurait diminué de l'ordre de 1.2°C au passage MWP-LIA ($0.7/0.58$). Cette estimation peut être considérée comme minimale étant donné que la température hypolimnionique a probablement légèrement diminué dans le même temps, mais est tout de même à considérer avec prudence étant donné les réserves qui peuvent être émises quant à la relation $\delta^{18}\text{O}_L$ -MAAT et en ce qui concerne la relative faible profondeur du site C19, ainsi que des éventuelles modifications hydrologiques qui ne peuvent être exclues. Cette reconstitution postulerait donc que le réchauffement enregistré depuis le début du 20^e siècle n'a pas compensé la diminution de température à la transition MWP-LIA.

D'autre part, la variation de -0.3‰ enregistrée entre 40 et 30cm au niveau du $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates totaux, peut être interprétée comme la combinaison entre la variation du rapport $\delta^{18}\text{O}_L$ global et de la température moyenne estivale, le $\delta^{18}\text{O}$ de l'épilimnion estival étant dans le lac de Neuchâtel probablement en grande partie contrôlé par le $\delta^{18}\text{O}_L$ global (apports liquides estivaux/volume de l'épilimnion <0.2 ; évaporation faible).

La comparaison de la Figure 5.38. est donc à considérer avec certaines réserves, qui proviennent également des éventuelles erreurs sur la chronologie de C19c et de l'échantillonnage non continu de cette carotte.

Les constatations que l'on peut tirer de cette comparaison sont les suivantes: il y a une bonne correspondance entre les avancées des glaciers, les reconstitutions de température et le profil du $\delta^{18}\text{O}_{C.n.}$ depuis environ 1600. Par contre, les avancées antérieures des glaciers (documentées également dans d'autres endroits, cf. Grove, 1994) n'ont pas leur correspondant dans le profil du $\delta^{18}\text{O}_{C.n.}$, et notamment en ce qui concerne celle du 14^e siècle, considérée comme caractérisant le début du petit âge glaciaire.

Il semble y avoir en fait décalage entre cette première détérioration climatique du LIA et son enregistrement au niveau du $\delta^{18}\text{O}_{C.n.}$, ce qui pourrait s'expliquer par le relativement mauvais contrôle sur la chronologie de C19c.

Si les évidences d'une période médiévale globalement chaude et d'un LIA globalement plus froid en Europe sont relativement ténues en ce qui concerne les cernes des arbres, les périodes d'avancée et de retrait des glaciers ainsi que les documents historiques (cf. 5.12.7.), excepté pour la Fennoscandie, les évidences au niveau des isotopes stables de l'oxygène commencent à s'accumuler. La reconstitution de MAAT de von Grafenstein et al. (1992) pour la Bavière, postule notamment des valeurs modernes inférieures à celles de toute la période Holocène. Les sédiments d'un site profond de l'Ammersee récemment étudié enregistrent également une variation de l'ordre de -0.5‰ du $\delta^{18}\text{O}$ de valves de *Candona* depuis 1000BP (von Grafenstein, comm.pers.).

L'évolution vers des valeurs plus négatives entre 10 et 6cm de profondeur du $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates totaux diffère de celle du $\delta^{18}\text{O}_{C.n.}$. Cette évolution récente ne peut donc être interprétée comme étant due à une variation de $\delta^{18}\text{O}_P$ contrairement à ce que postulent McKenzie & Hollander (1993) pour le Greifensee. Des deux explications possibles, prolongement de la précipitation de calcite durant l'été ou précipitation en déséquilibre, la seconde est la plus plausible. En effet, notre expérimentation par pièges à sédiments (paragraphe 4.11.) a montré qu'une précipitation en déséquilibre était possible en période de forte productivité et qu'elle était associée à des calcites de relativement grande taille (8-16 μm). Or la tendance vers des valeurs plus négatives du $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates totaux apparaît plus ou moins conjointement avec l'augmentation de la productivité dans le lac et avec l'apparition de calcites de taille supérieure à 8 μm . Il est toutefois possible qu'une prolongation de la précipitation au cours de l'été ait eu lieu mais la comparaison avec les enregistrements d'autres lacs rend cette hypothèse improbable pour la plupart des lacs où le $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates totaux montre une évolution vers des valeurs plus négatives conjointement avec l'augmentation récente de l'eutrophisation. Une variation du rapport $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates totaux de 3-4 ‰ (Greifensee: McKenzie & Hollander, 1991; lac de Lugano: Niessen, 1987; lac Ontario: Schelske & Hodell, 1991) implique en effet une variation de 12-16 $^\circ\text{C}$ de la température de l'eau, ce qui est bien évidemment impossible. Une diminution de la proportion des carbonates allochtones conjointement avec l'augmentation de l'eutrophisation est possible, mais comme dans le cas de l'enregistrement du lac de Neuchâtel, cette diminution ne peut probablement pas expliquer des variations si importantes du $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates totaux.

Schéma interprétatif de l'évolution paléoenvironnementale depuis 1500BP

Un schéma interprétatif est présenté à la Figure 5.39. Deux phases majeures de déforestation sont enregistrées et sont situées chronologiquement approximativement vers 600-700AD et vers 1200-1400AD. Leur influence sur l'érosion des sols se ressent dans la composition du sédiment qui devient moins carbonatée. L'influence de l'impact de l'homme sur la végétation est par ailleurs enregistrée par une augmentation du taux d'accumulation de résidu insoluble du Subboréal au Subatlantique récent. La tendance vers des valeurs plus positives du $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates totaux et des valves des ostracodes entre l'intervalle L5 et la base de L3 peut également être interprétée comme le reflet d'une forte perturbation de l'état des sols du bassin versant.

Les indications de modification du niveau trophique du lac et d'augmentation de la production primaire suite aux phases de déforestation sont fournies par:

- les assemblages fossiles d'ostracodes de la carotte C19c, avec une représentation plus importante de taxons peu sensibles à l'augmentation de l'eutrophisation;
- les diatomées de la carotte LN03, analysée par Straub (1993), qui laissent apparaître une augmentation de la représentation de taxons indicateurs de milieux eutrophes et une augmentation générale des restes de frustules. Ces indications sont toutefois relativisées par les informations apparemment contradictoires provenant de l'analyse des diatomées de la carotte C19c et des ostracodes de la carotte LN01.

Les évidences d'une augmentation du flux sédimentaire de carbone organique durant les mêmes périodes sont ténues. Si l'on postule toutefois que le taux d'accumulation totale a augmenté durant les phases de déforestation, il faut l'admettre également pour celui de carbone organique. Cette hypothèse semble confirmée par l'évolution du rapport C/N que l'on peut interpréter comme étant due à une meilleure préservation de la matière organique au cours de la diagenèse précoce en période de taux d'accumulation élevé.

L'évolution du climat et en particulier le refroidissement postulé à la transition MWP-LIA ne semble pas avoir eu d'influence importante sur la production primaire ni sur la production de calcite endogénique.

Pour ce qui concerne l'évolution récente de l'écosystème lacustre, les évidences d'eutrophisation croissante sont sensibles au cours des intervalles L2 et L1; la proportion et le taux d'accumulation de carbone organique augmentent au sommet de L2 et à la base de L1 (Fig.5.32.); l'augmentation concomitante de la proportion et du taux d'accumulation de résidu insoluble est toutefois surprenante; elle pourrait être due au développement d'une agriculture intensive au cours du 20^e siècle, cette augmentation étant toutefois relativisée par le fait que le taux d'accumulation moyen de résidu insoluble du Subatlantique récent atteint des valeurs équivalentes à celui de L1 (Fig.5.31.). La forte régression de la représentation de *Limno-* et de *Leucocythere* au cours de L2 et L1 constitue une évidence supplémentaire d'une eutrophisation croissante de même que les variations enregistrées au niveau des assemblages de diatomées avec l'apparition de nombreux taxons indicateurs de milieux eutrophes. En dernier lieu, la tendance vers des valeurs plus négatives du rapport $\delta^{13}\text{C}_{\text{C.N.}}$ à la transition L3-L2 est indicative d'une minéralisation accélérée dans l'hypolimnion.

Comparaison avec d'autres enregistrements lacustres

Les enregistrements d'autres lacs péri-alpins de taille moyenne à grande laissent apparaître des phases de changements environnementaux majeurs et d'impact anthropique sur l'écosystème lacustre à la fin du Haut Moyen Age ainsi que durant le Moyen Age:

- Lac d'Annecy: entre 1000 et 1400AD environ (Higgit et al., 1991)
- Grabensee et Attersee (Autriche): vers 1200BP (Schneider et al., 1990)
- Lac de Constance: Haut Moyen Age et depuis 1600AD (Ostendorf, 1990)

Dans le cas du lac de Lugano, si l'impact le plus important sur la végétation semble avoir eu lieu durant le Haut Moyen Age, les principales influences anthropogéniques sur la sédimentation ont pris place durant l'Age du Bronze et du Fer (Niessen et al., 1992).

Les différences chronologiques qui transparaissent de ces enregistrements peuvent être dues à de nombreux facteurs: différence de morphologie du bassin versant, de couverture végétale, d'utilisation des sols ou d'occupation du territoire par l'homme. Des études à haute résolution seraient profitables sur d'autres lacs périalpins afin d'avoir une meilleure vision des modifications de l'utilisation des sols par l'homme.

5.13. Conclusions

Le taux d'accumulation récente dans le lac de Neuchâtel a été reconstitué pour plusieurs sites grâce à la datation de la carotte C37 (méthodes du ^{137}Cs et du ^{210}Pb) et aux corrélations entre les différentes carottes (pic de concentration en talc et teneur en carbone). Ce taux est dépendant de la profondeur d'eau ainsi que de variations spatiales du focusing de sédiment qui sont probablement à relier à l'influence des courants profonds sur la remise en suspension et sur la répartition du sédiment.

Les teneurs élevées en talc et en kaolinite apparaissent de manière associée dans les sédiments du lac de Neuchâtel. Les apports associés de ces minéraux sont reliés à l'activité d'une ancienne papeterie située à Serrières, près de Neuchâtel. Les différentes estimations de l'accumulation du talc laissent apparaître une diminution de type exponentiel avec la distance à la source supposée, diminution toutefois plus forte en direction du bassin SE qu'en direction du bassin NW du lac. Cette dernière observation est probablement imputable à l'obstacle à la dispersion des particules constitué par la dorsale de "la Motte", qui sépare les deux bassins.

L'analyse pollinique détaillée du sédiment depuis 1500BP laisse apparaître deux phases majeures d'impact anthropique sur la végétation, la première à la fin du Haut Moyen Age vers 600-700AD et la seconde durant le Moyen Age, vers 1200-1500AD. Ces phases de déforestation ont probablement atteint des zones relativement élevées du bassin versant, les hêtraies-sapinières ayant été touchées durant la première et l'épicéa régressant fortement au cours de la seconde. Une troisième phase de déforestation est enregistrée dans une carotte étudiée par un autre auteur (Ph.Hadorn) et se situe chronologiquement vers 1000AD. Les influences de la modification de la couverture végétale sur l'écosystème lacustre se manifestent de plusieurs façons; l'augmentation générale du taux de sédimentation de résidu insoluble du Subboréal au Subatlantique récent, la corrélation entre les teneurs minimales en carbonates et les phases de déforestation, ainsi que les évidences d'un changement majeur dans la composition du DIC amené au lac laissent à penser que les défrichements ont provoqué une érosion accrue des sols; la modification des assemblages d'ostracodes et l'augmentation d'indicateurs d'eutrophie dans les restes de diatomées nous amènent à postuler que l'érosion accrue des sols a provoqué une perturbation de l'écosystème lacustre par une augmentation des apports de sels nutritifs au lac et probablement une légère augmentation de la productivité primaire.

Une accélération récente de l'eutrophisation est observée. Elle a débuté au siècle passé déjà et se manifeste par une augmentation du flux de carbone organique, par l'apparition de nouveaux taxons de diatomées indicateurs de milieux eutrophes ainsi que par une augmentation de la minéralisation dans l'hypolimnion indiquée par l'évolution du rapport $\delta^{13}\text{C}$ des valves d'ostracodes. L'augmentation de la taille des calcites endogéniques est également reliée à l'augmentation récente de l'eutrophisation, avec probablement des vitesses de cristallisation rapides entraînées par des sursaturations plus élevées.

Les analyses des isotopes stables de l'oxygène sur valves d'ostracodes et sur carbonates totaux laissent apparaître une modification de la composition locale de l'eau du lac entre 1300 et 1500AD, avec une diminution de l'ordre de 0.7‰ des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des ostracodes. Cette évolution nous permet de postuler une diminution de la température moyenne de l'air de l'ordre de 1 à 1.5°C à la transition entre l'Optimum Climatique Médiéval et le Petit Age Glaciaire.

Une tendance vers des valeurs plus négatives du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates totaux s'observe en concordance avec l'augmentation récente de l'eutrophisation, tendance qui est absente au niveau du rapport $\delta^{18}\text{O}$ des valves d'ostracodes. Cette évolution est interprétée comme étant due à une précipitation en déséquilibre, à relier probablement avec des vitesses de cristallisation élevées.

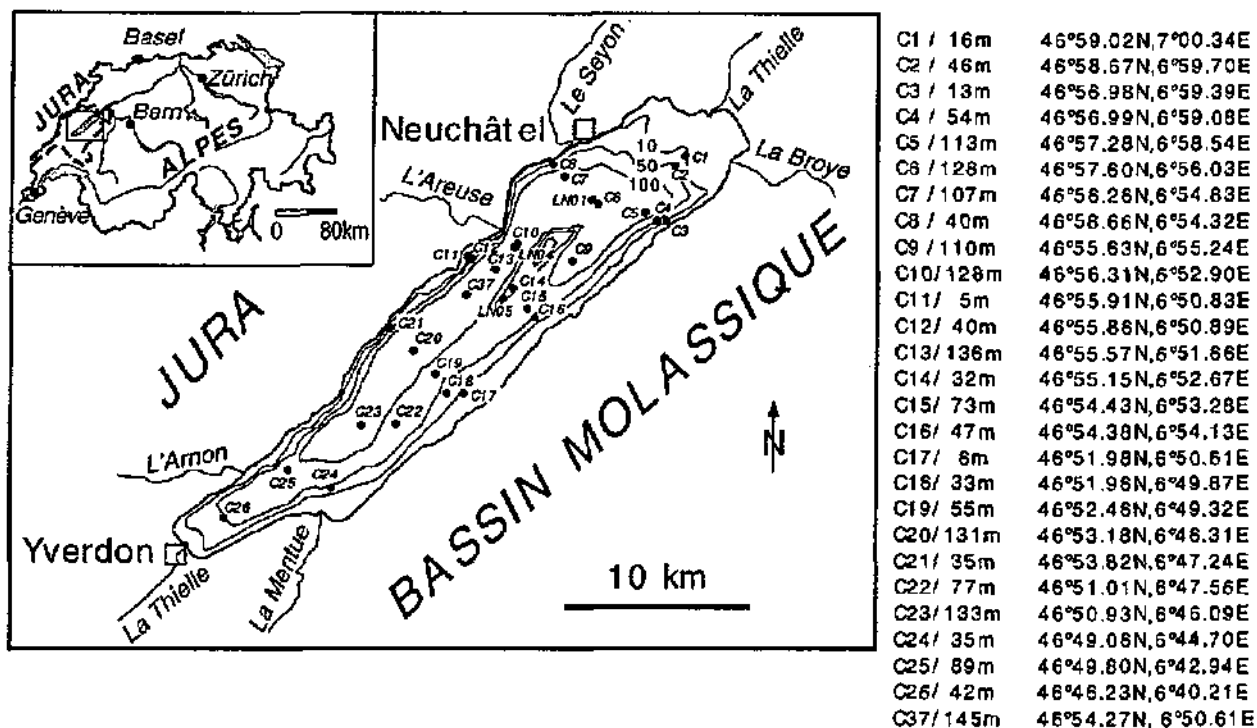


Fig.5.1. Localisation des stations de prélèvement des carottes courtes ainsi que des carottes LN01, 04 et 05 (cf. Schwalb, 1992)

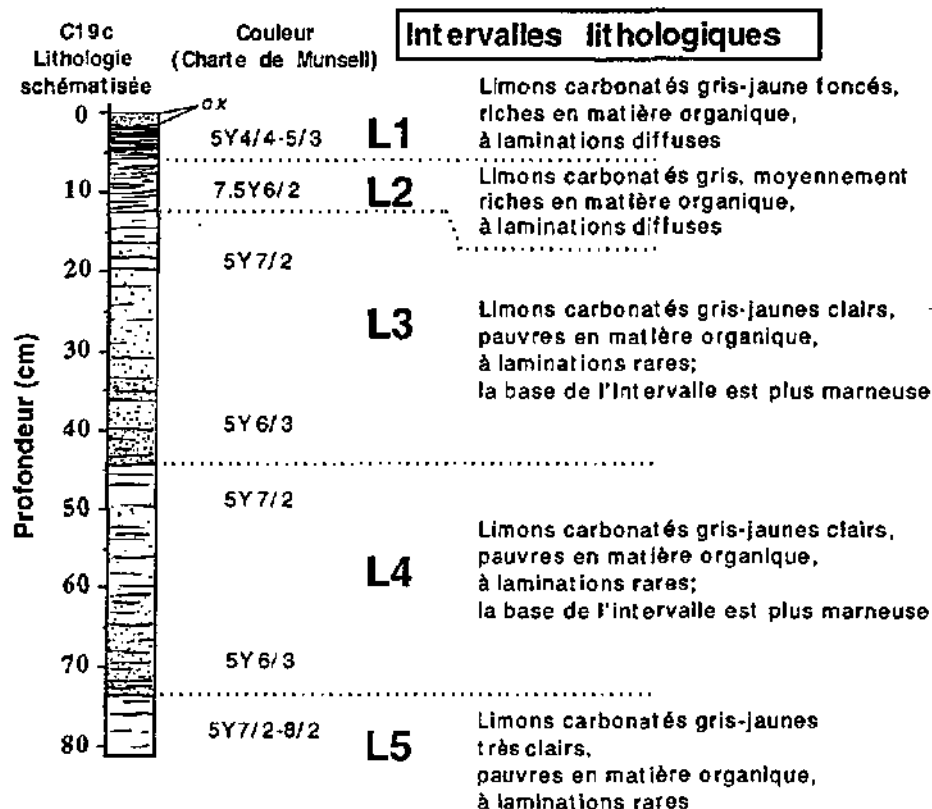


Fig.5.2. Description lithologique générale des carottes courtes appliquée à la carotte C19c; division en cinq niveaux lithologiques; les niveaux L4 et L3 présentent des lithologies très semblables et se distinguent par leur base plus marneuse; ox: couche oxydée

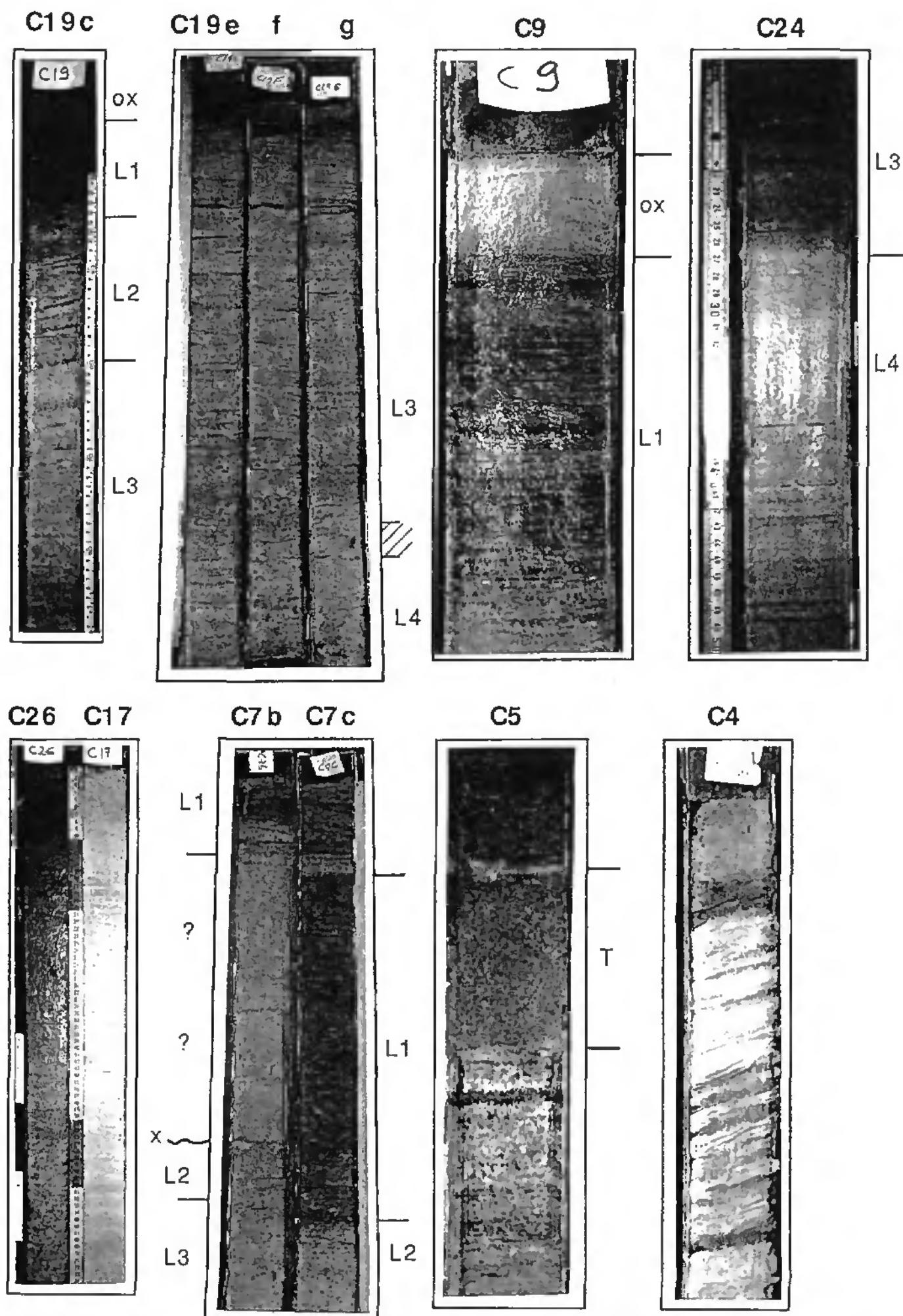


Fig.5.3. C19: succession des intervalles lithologiques (ox:couche oxydée); C19e-g: limite L4-L3; C9: détail de l'intervalle L1 avec présence de laminations diffuses; C24: limite L3-L4; C26: faciès marneux typique du Haut-lac; C17: faciès de beine, $\text{CaCO}_3 > 90\%$; C7b-c: variation de faciès sur le même site (x: nv érosif); C5 et C4: faciès turbiditiques <u sein du tombant et à sa base, au large de Cudrefin

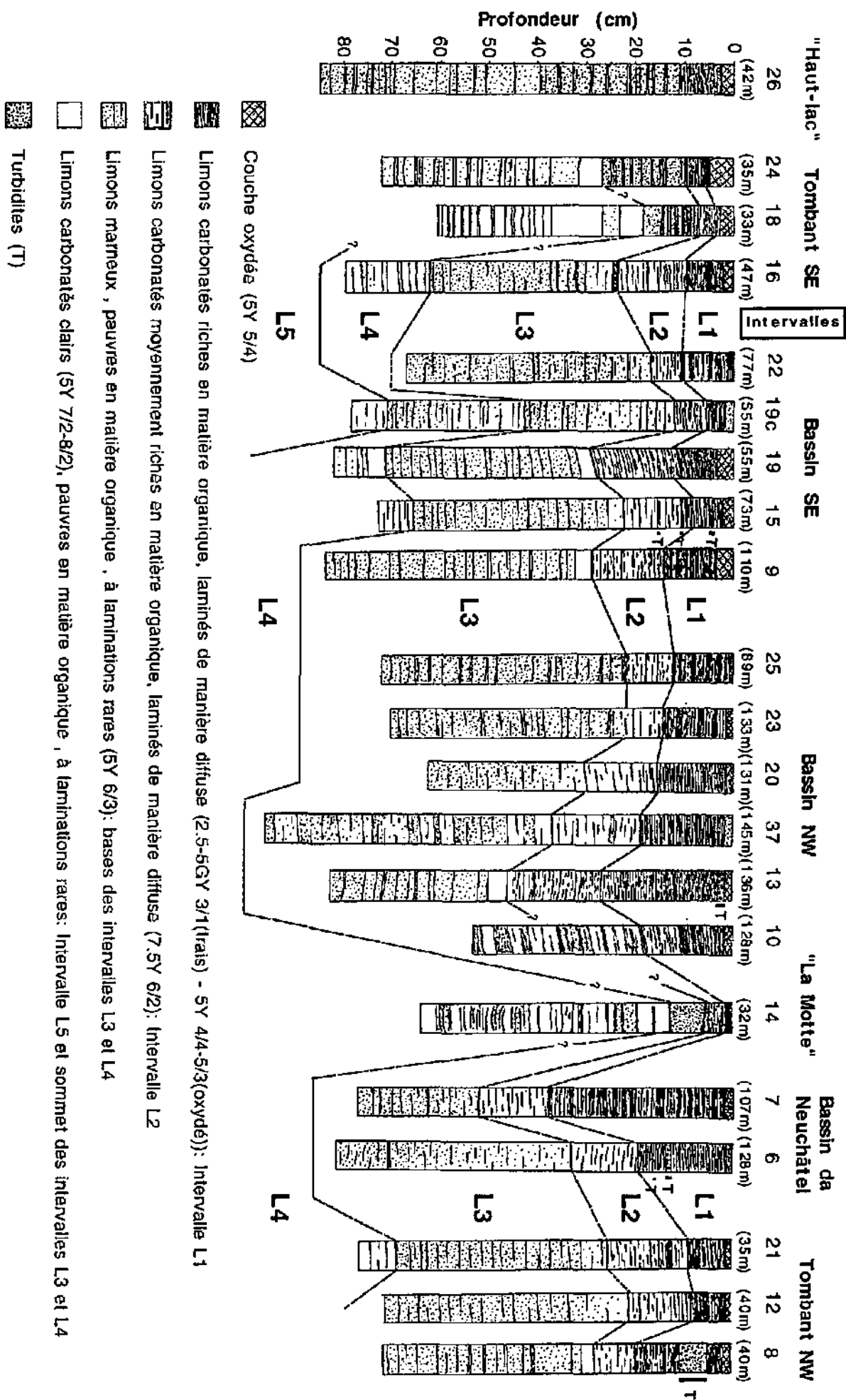


Fig.5.4. Corrélation des carottes courtes sur la base de la lithologie

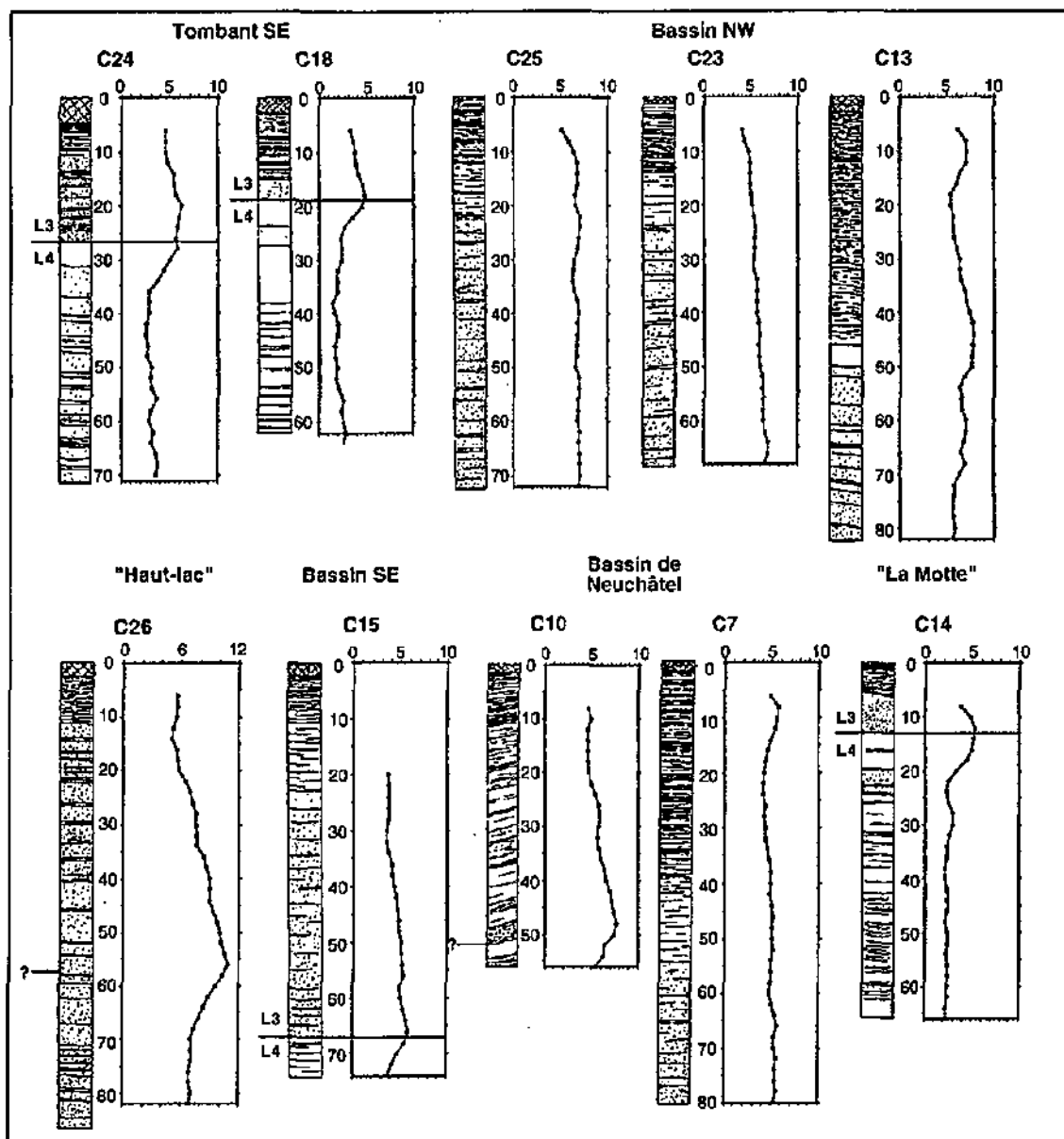
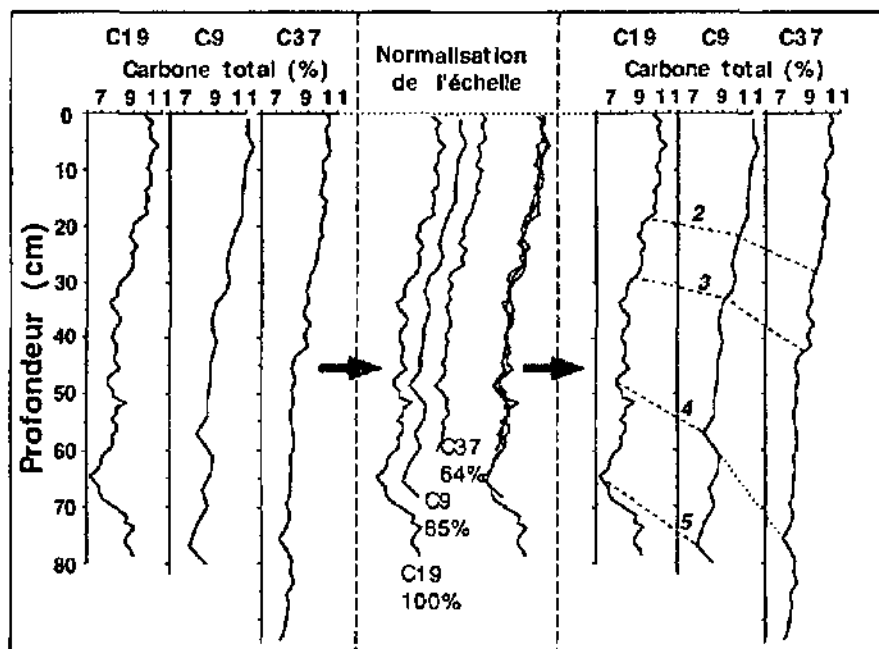


Fig.5.5. Profils de susceptibilité magnétique volumique (10^{-5} S)

A



B

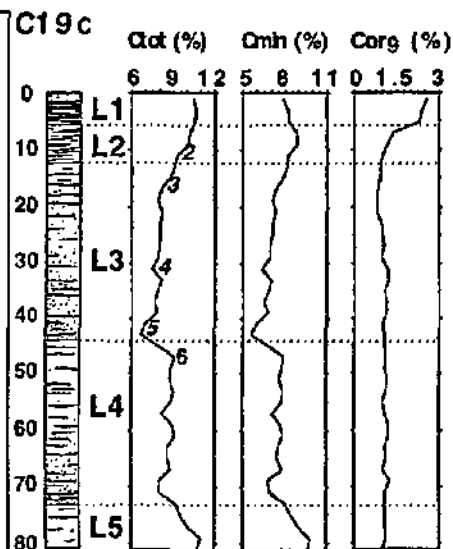


Fig.5.6. A) Présentation de la méthode de corrélation basée sur la teneur en carbone total; A gauche: profils non normalisés; Au centre: normalisation de l'échelle et tentative de superposition des courbes; A droite: définition de niveaux de corrélation; B) Profils caractéristiques de carbone total, carbone inorganique et organique (C19c)

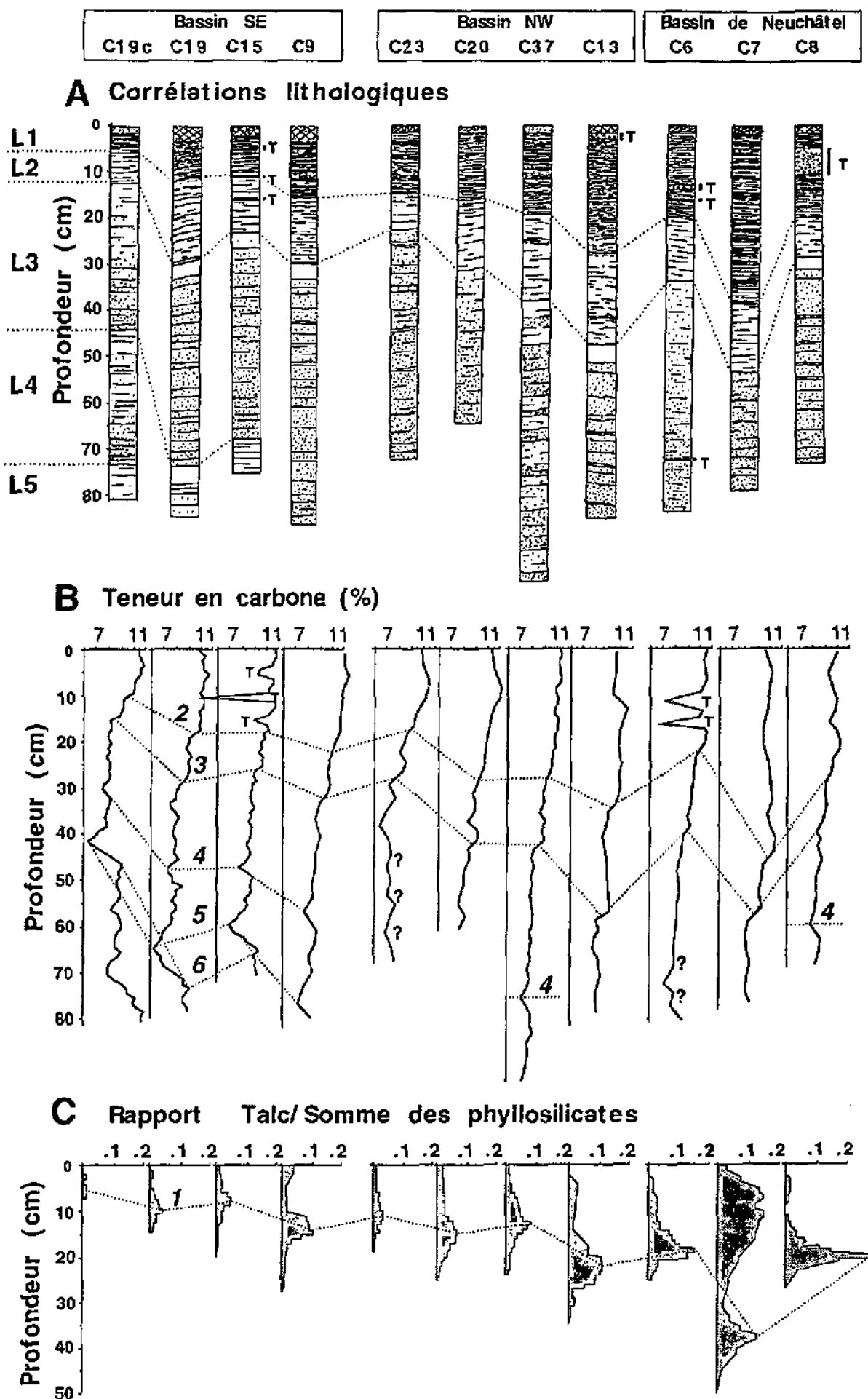


Fig.5.7. Corrélations des carottes courtes sur la base de la lithologie (A), de la teneur en carbone (B) et du rapport Talc/Somme des phyllosilicates dans la fraction 2-16 μ m (C). Plusieurs niveaux de corrélation (numérotés de 1 à 6) sont définis; T: niveau turbiditique

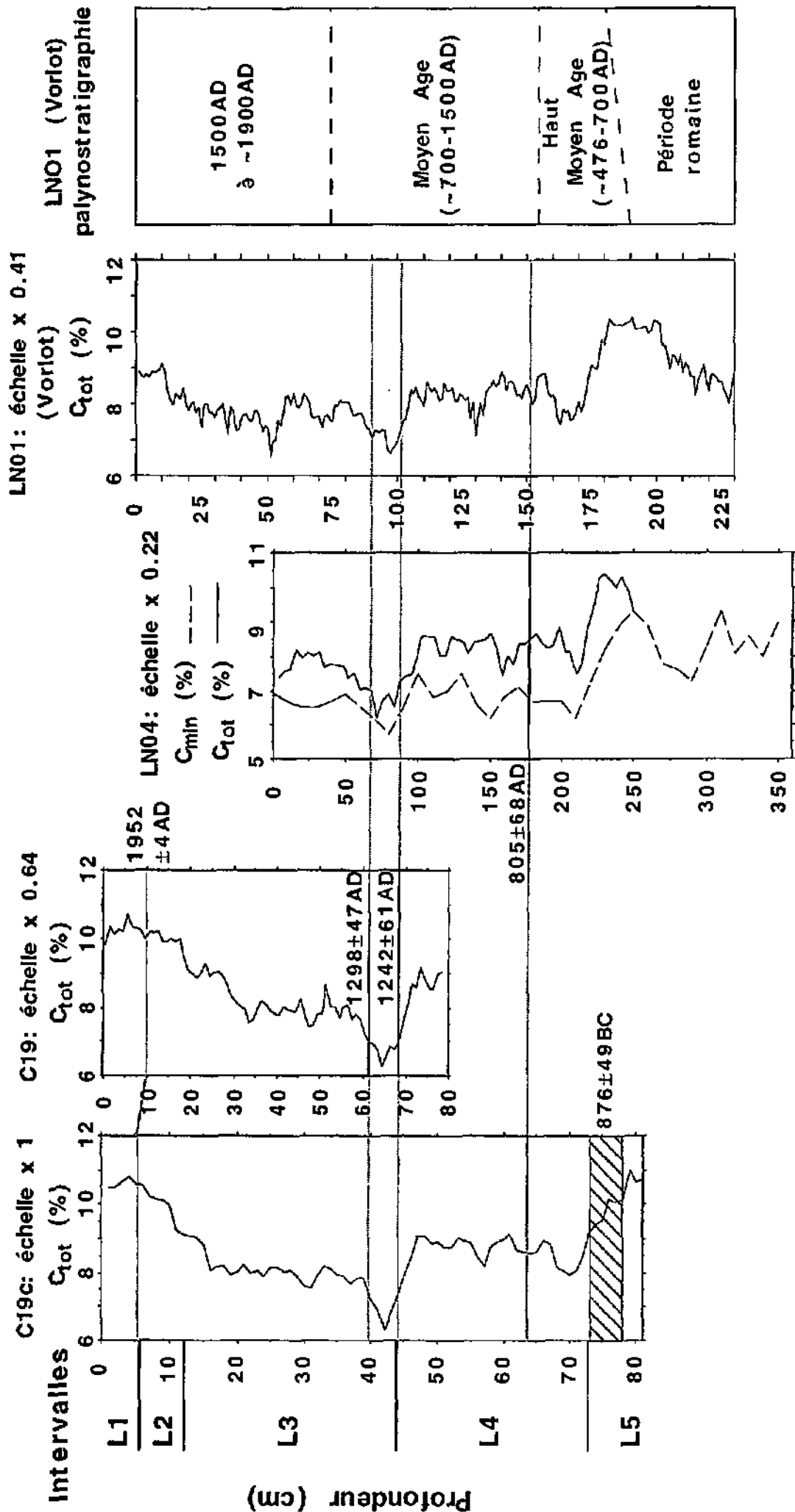
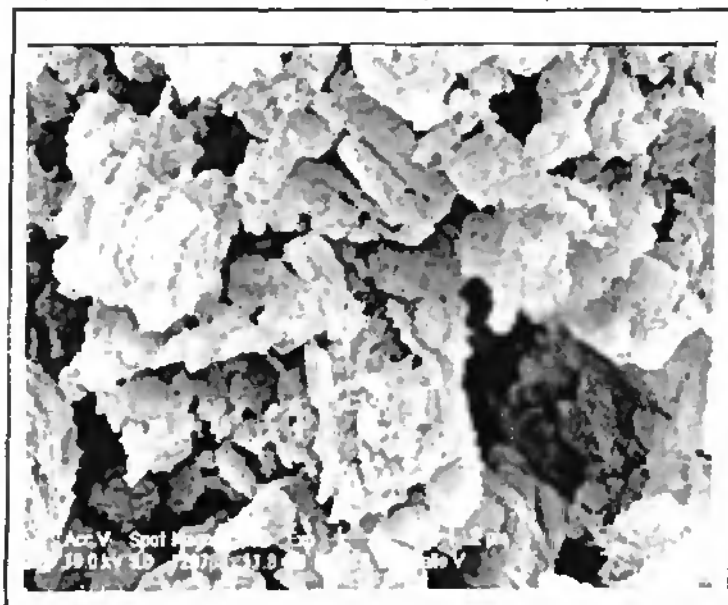
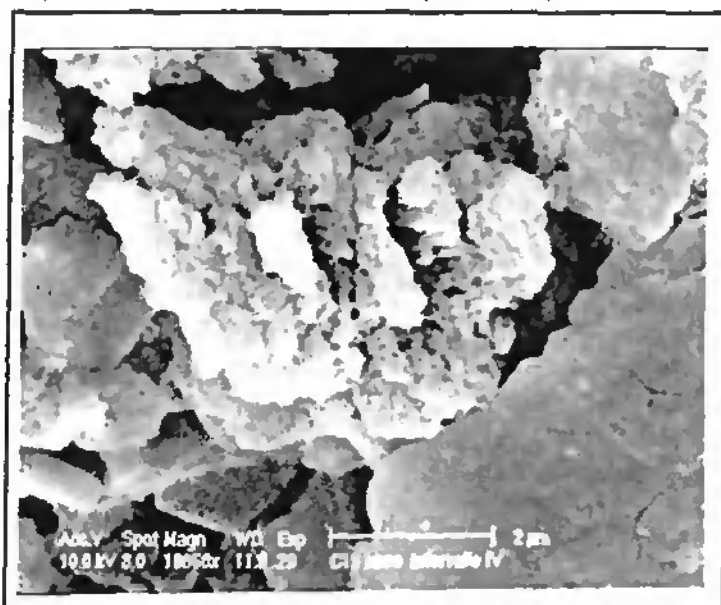


Fig.5.8. Cadre chronologique des carottes courtes. Les corrélations se basent sur les profils de teneur en carbone. Les deux datations AMS-¹⁴C de la carotte C19 sont effectuées sur des macrorestes terrestres, de même que celle de LN04 (Schwalb, 1992), alors que celle de C19c s'applique à des valves d'ostracodes et de lamellibranches. Les datations sont présentées en âges radiocarbone calibrés (programme CalibETH). Le cadre biochronologique de la carotte LN01 est présenté (Ph.Hadorn, données non publiées).

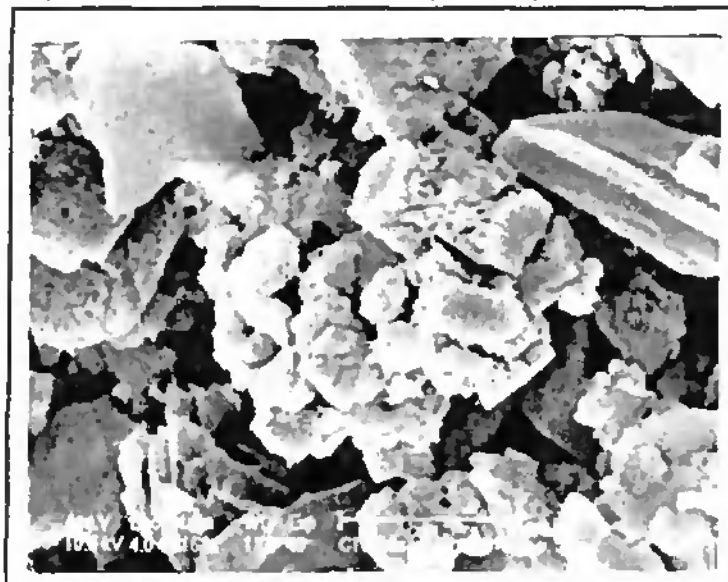
A) C19c Intervalle V (12878x)



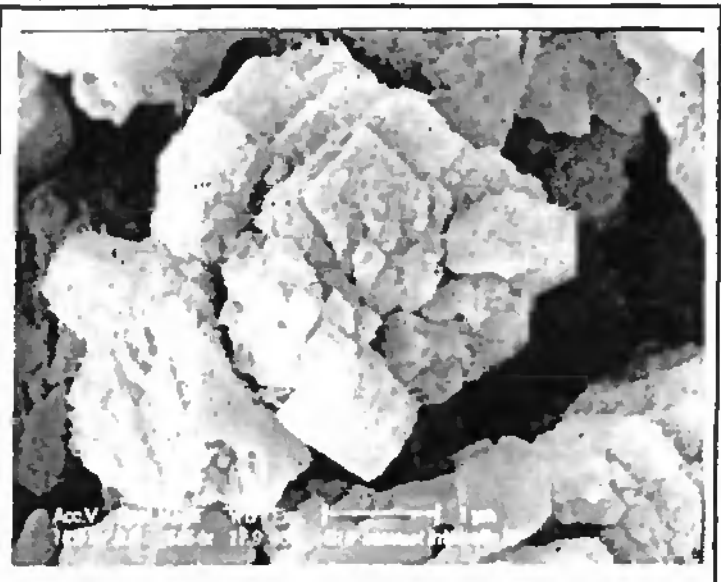
B) C19c Intervalle IV (18656x)



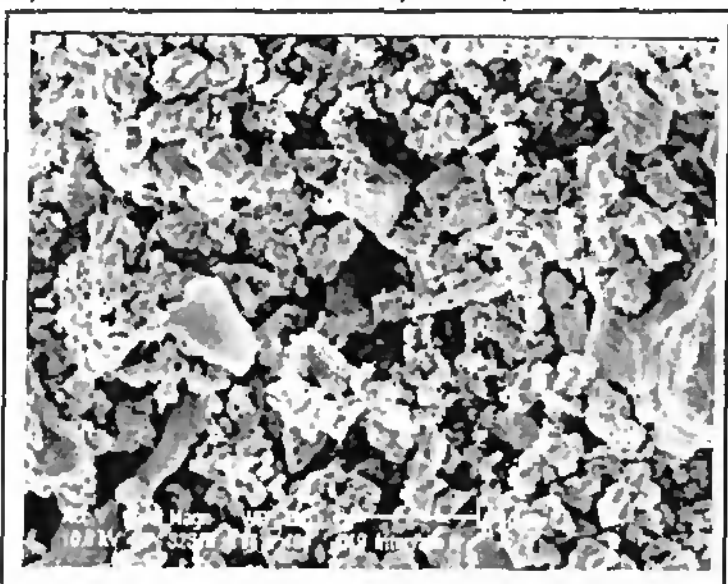
C) C19c Intervalle III (8158x)



D) C19c Intervalle III (25854x)



E) C19c Intervalle II (3231x)



F) C19c Intervalle I (7439x)

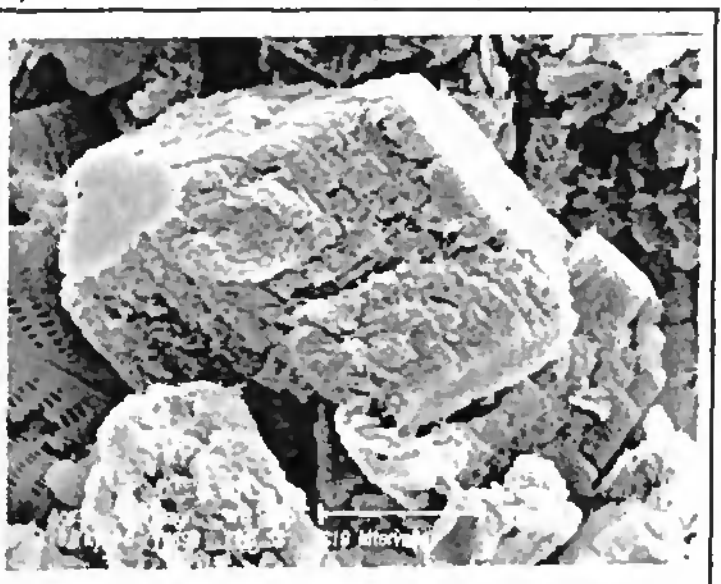
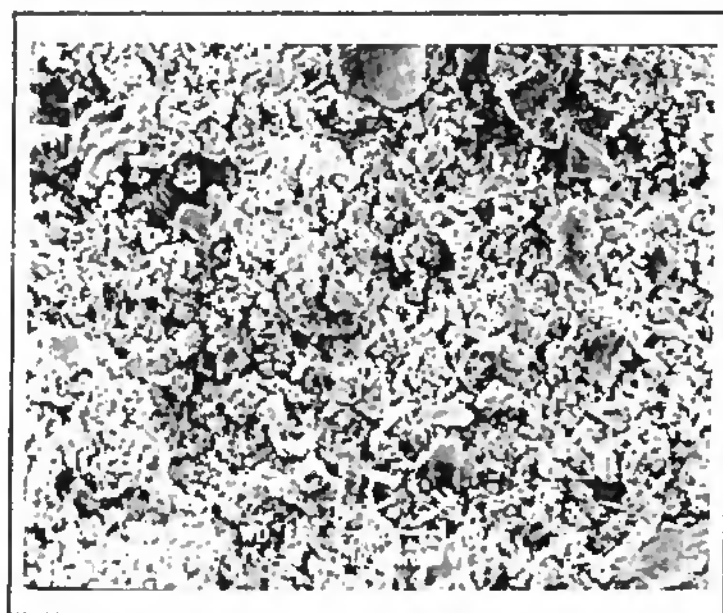
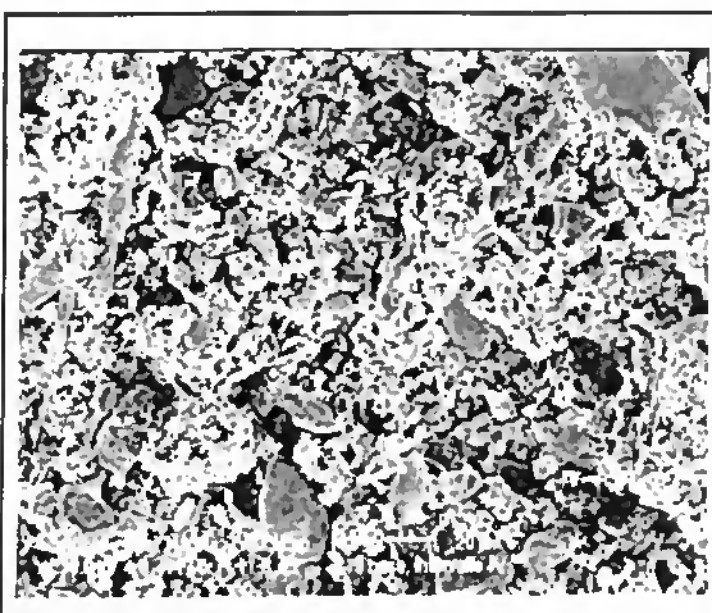


Fig.5.10. Aperçu des faciès caractéristiques des calcites des différents intervalles lithologiques; A) - D) Calcites endogéniques des intervalles L5 à L3, de taille généralement inférieure à <4µm avec parfois quelques signes de dissolution (D); E) Calcites de différentes tailles (jusqu'à 8µm) de l'intervalle L2; F) Calcite rhomboédrique caractéristique de l'intervalle L1 (taille d'environ 15µm)

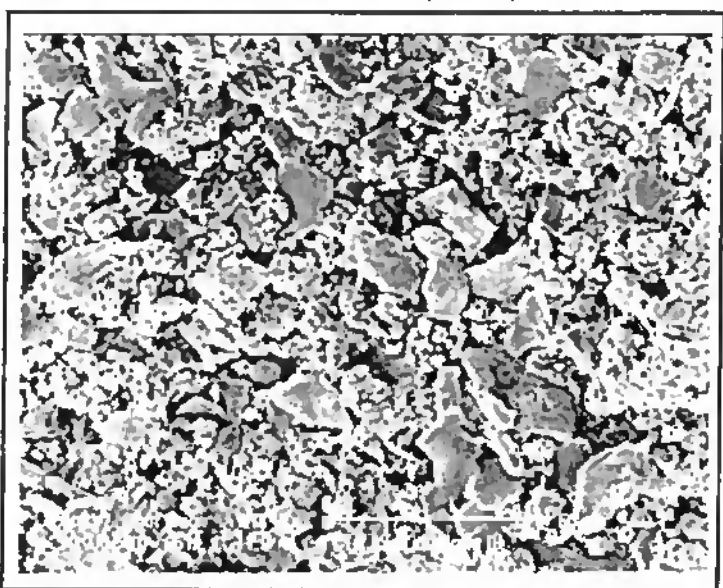
A) C19c Intervalle V (1243x)



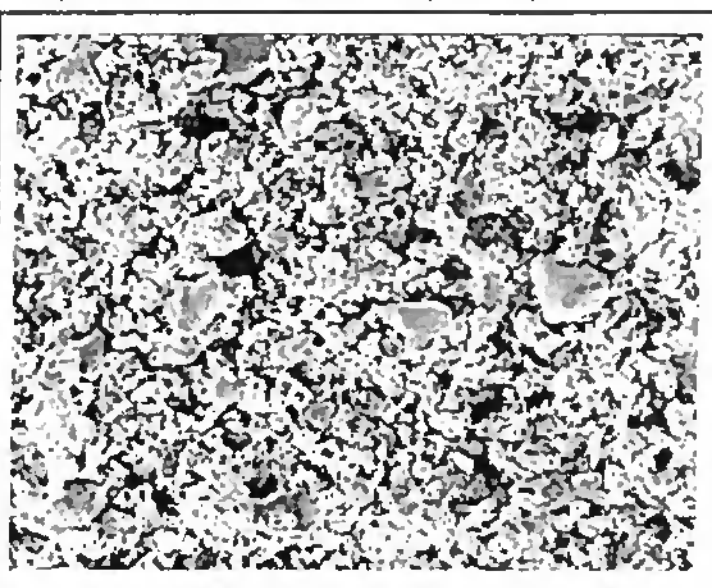
B) C19c Intervalle IV (1174x)



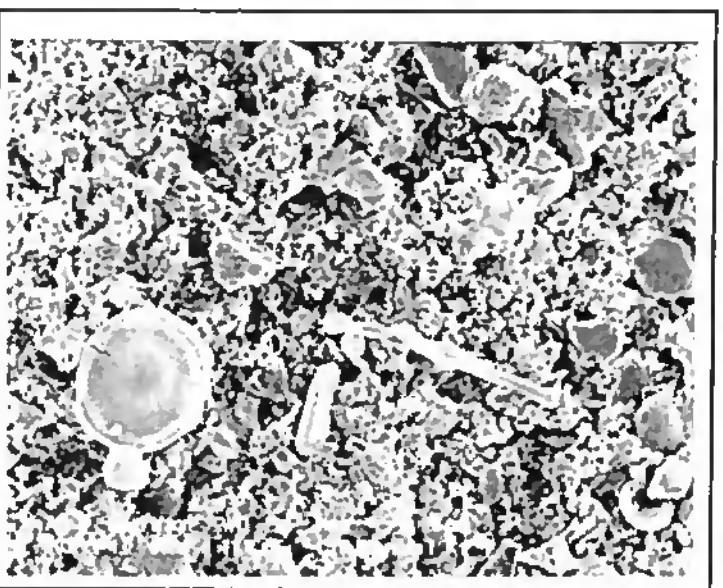
C) C19c Intervalle III (951x)



D) C19c Intervalle II (1084x)



E) C19c Intervalle I (988x)



F) C19c Intervalle I (3953x)

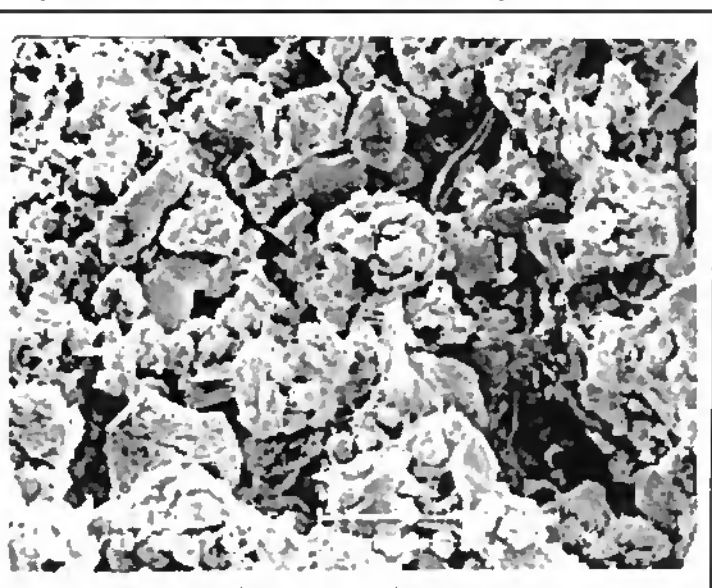


Fig.5.9. Aperçu général de la texture des différents intervalles lithologiques;
A) - C) Passage d'une texture dominée par de très fines particules de calcite ($<4\mu\text{m}$) (A) à une texture plus marquée par des particules détritiques (C); E) et F) Intervalle L1 marqué par des restes de diatomées relativement abondants et par des calcites de différentes tailles (jusqu'à $16\mu\text{m}$)

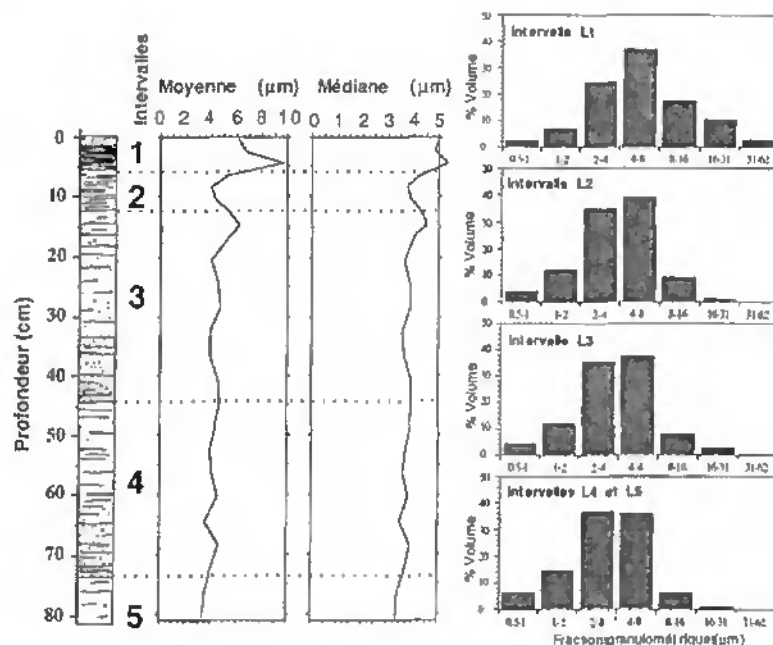


Fig.5.11. Granulométrie de la carotte C19c; spectres granulométriques des différents niveaux lithologiques

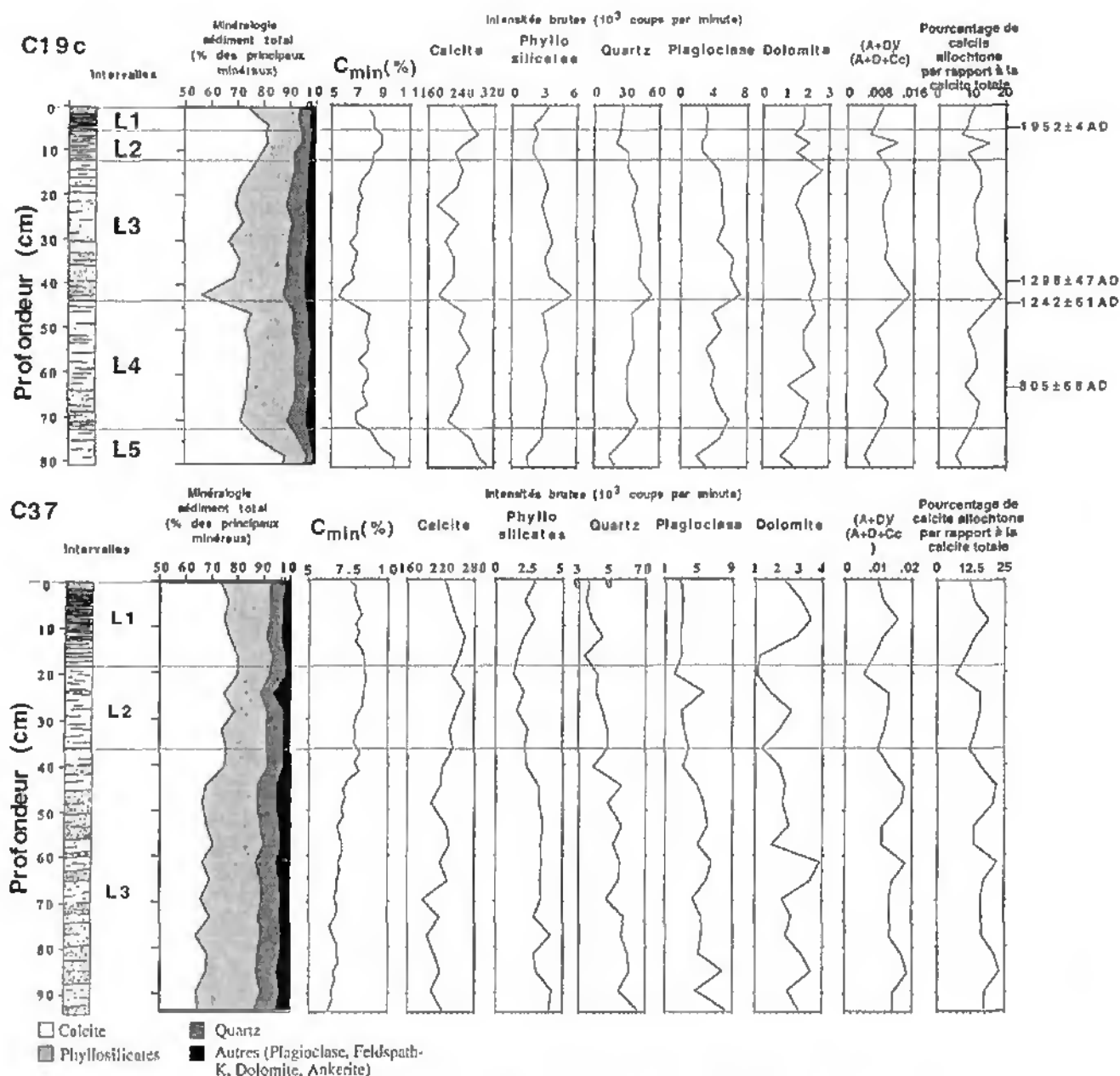


Fig.5.12. Minéralogie des carottes courtes C19c et C37; analyses RX effectuées sur poudres de sédiment; les dates indiquées pour la carotte C19c sont extrapolées (cf. Fig.5.8.)

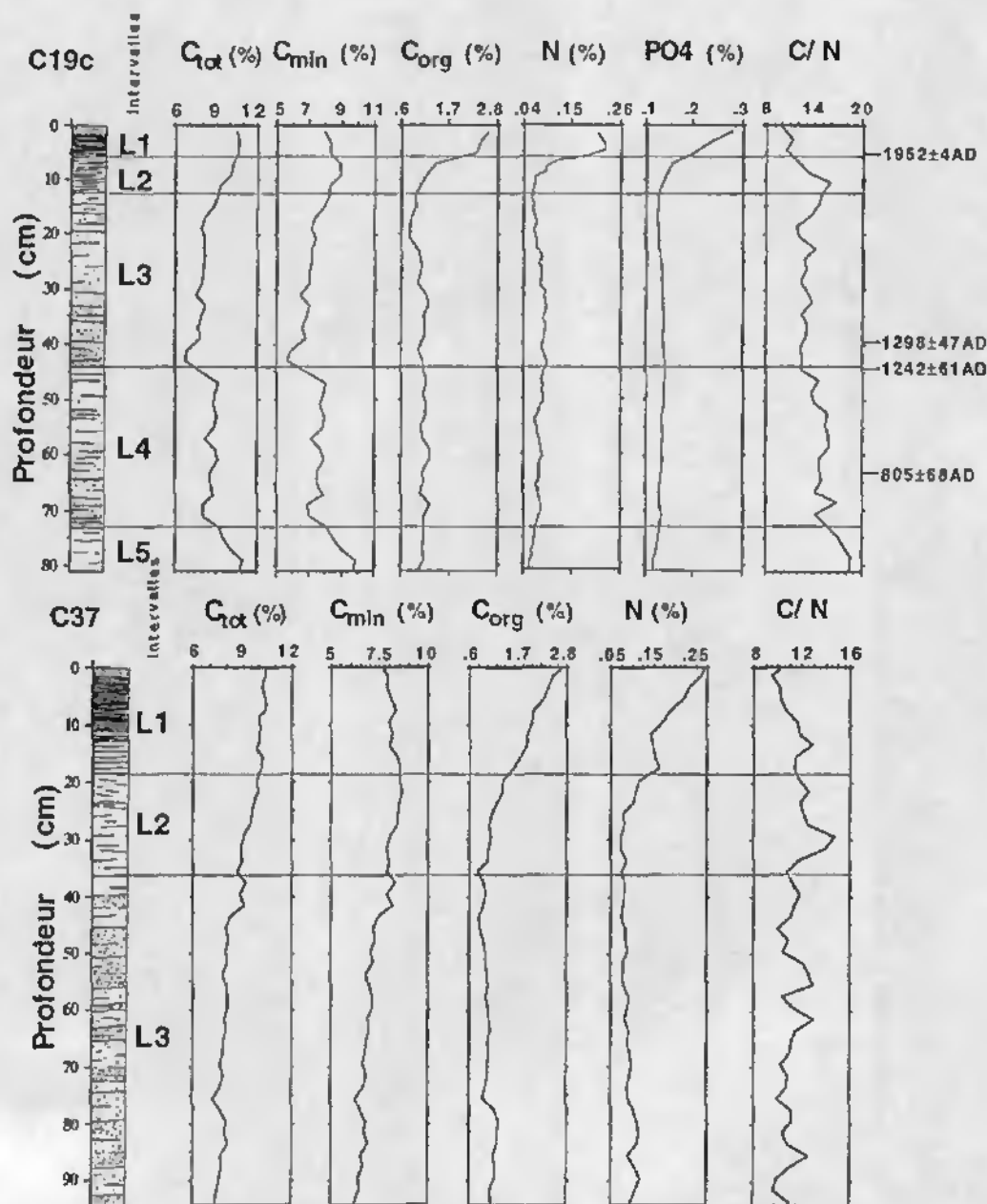
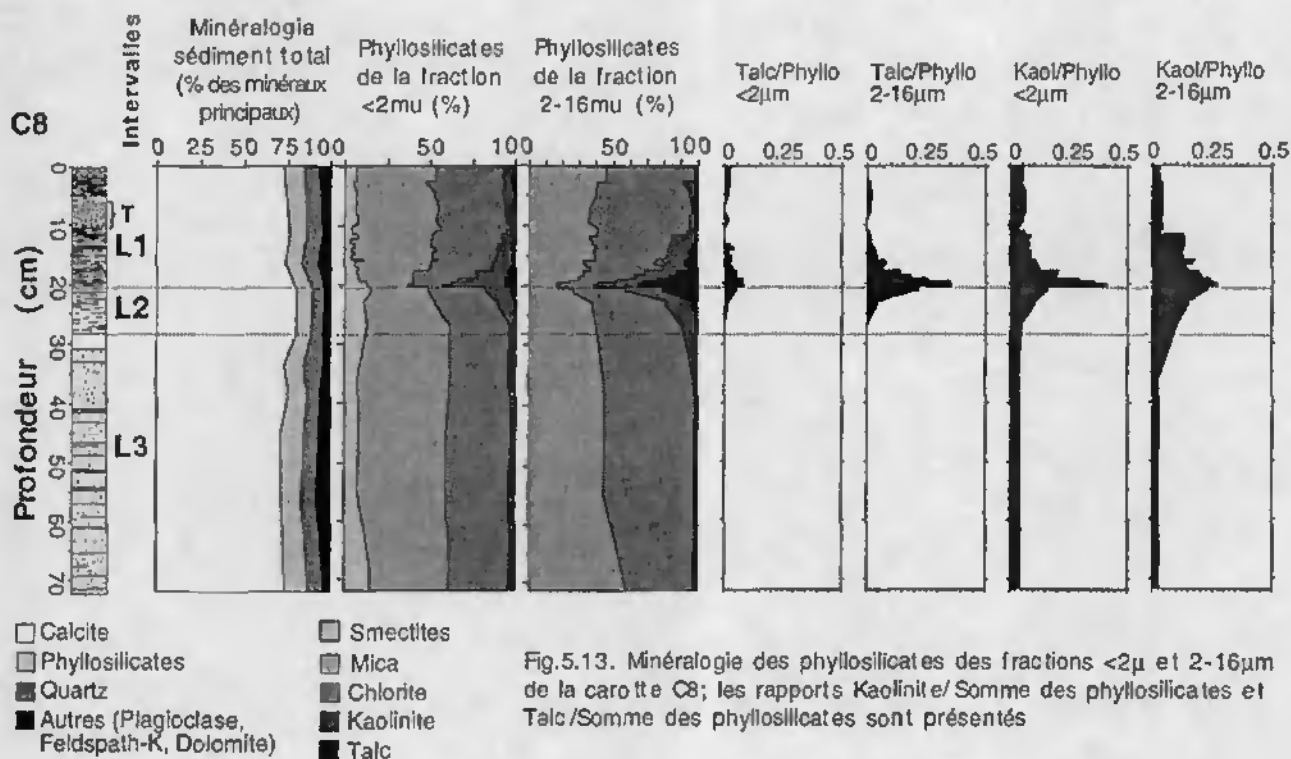


Fig.5.14. Profils des teneurs en carbone, azote et phosphate; carottes C19c et C37; les datations de la carotte C19c sont extrapolées à partir d'autres colonnes sédimentaires (cf. Fig.5.8.)

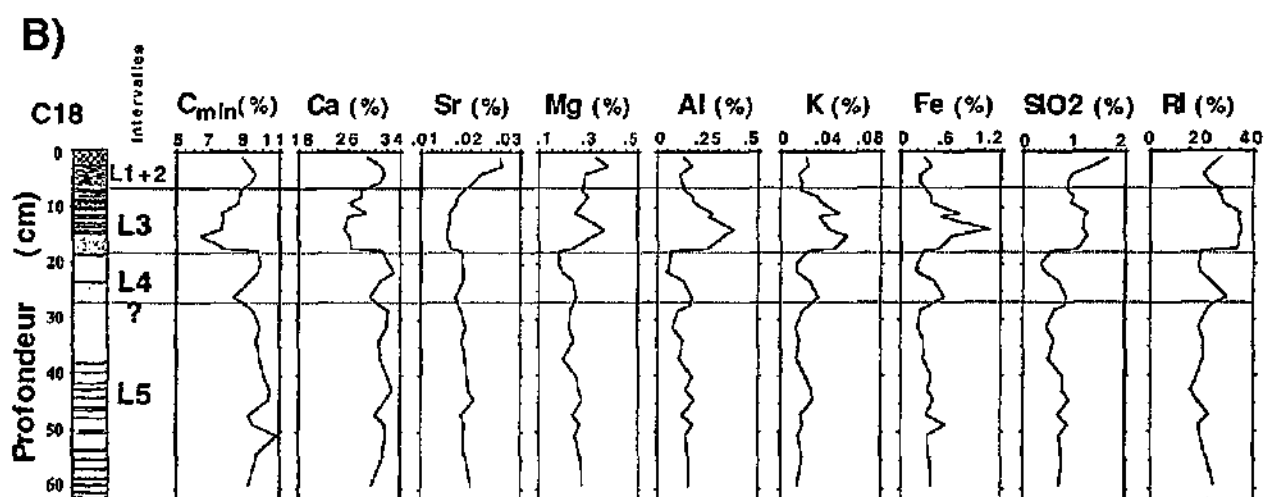
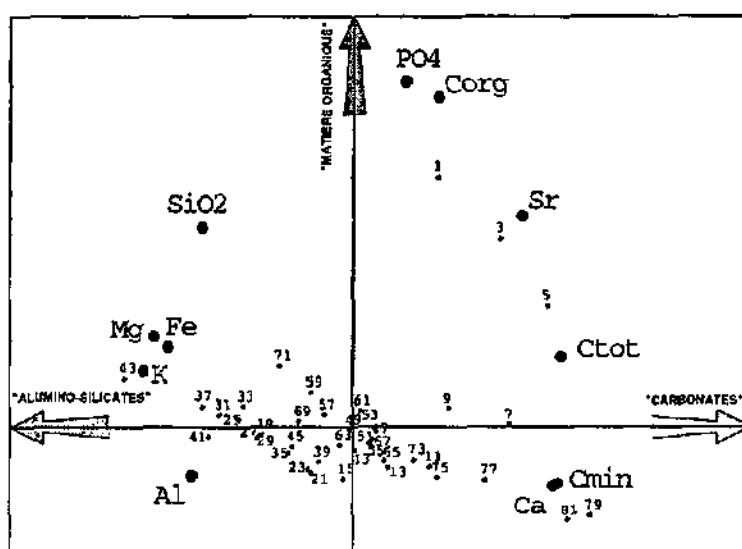
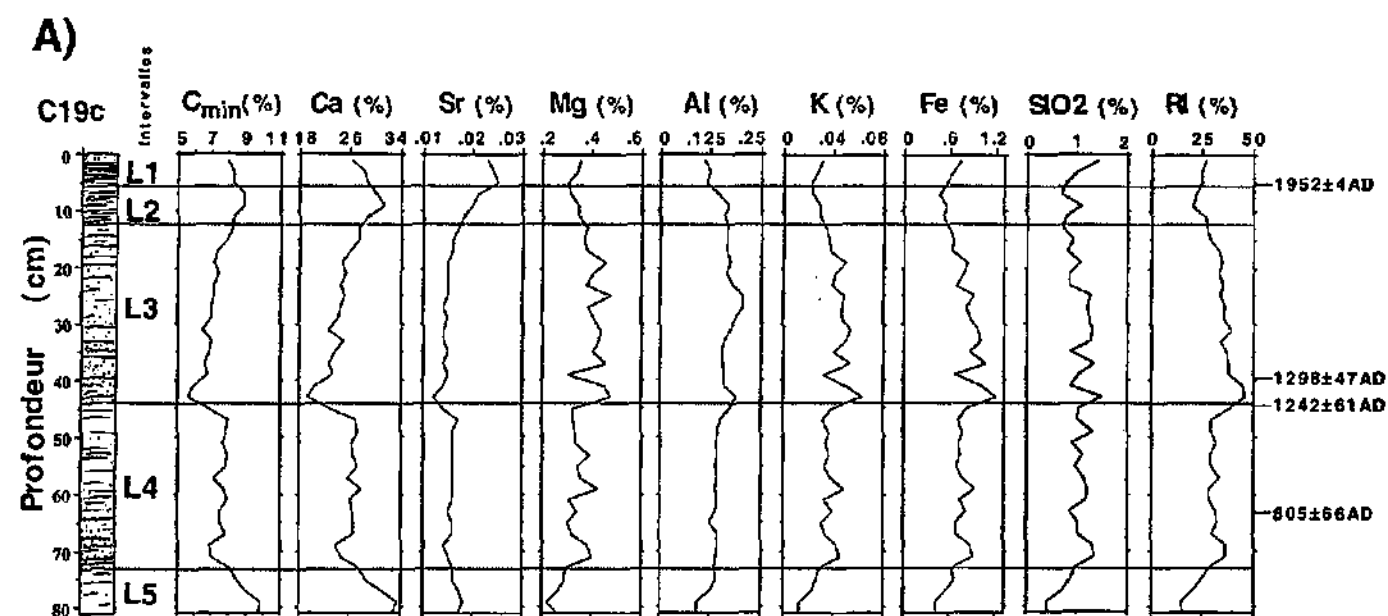


Fig.5.15. Profils des éléments majeurs analysés sur la carotte C19c (A) ainsi que sur la carotte C18 (B) et résultats de l'analyse factorielle en composantes principales (carotte C19c)

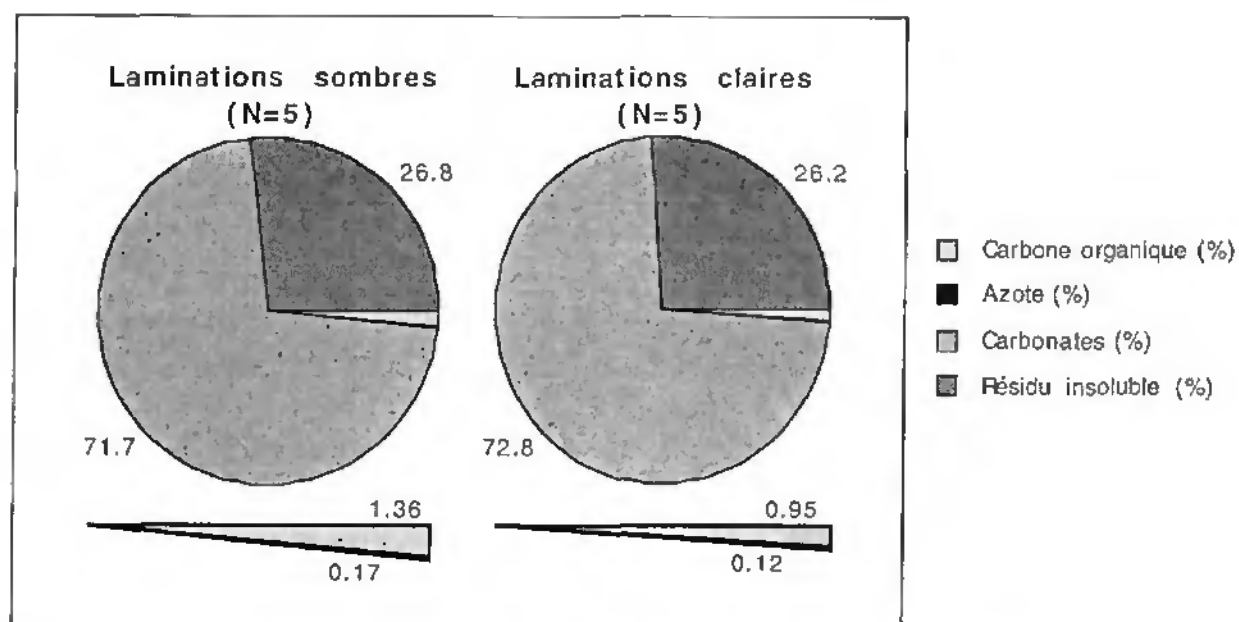


Fig.5.16. Composition des laminations sombres et des laminations claires

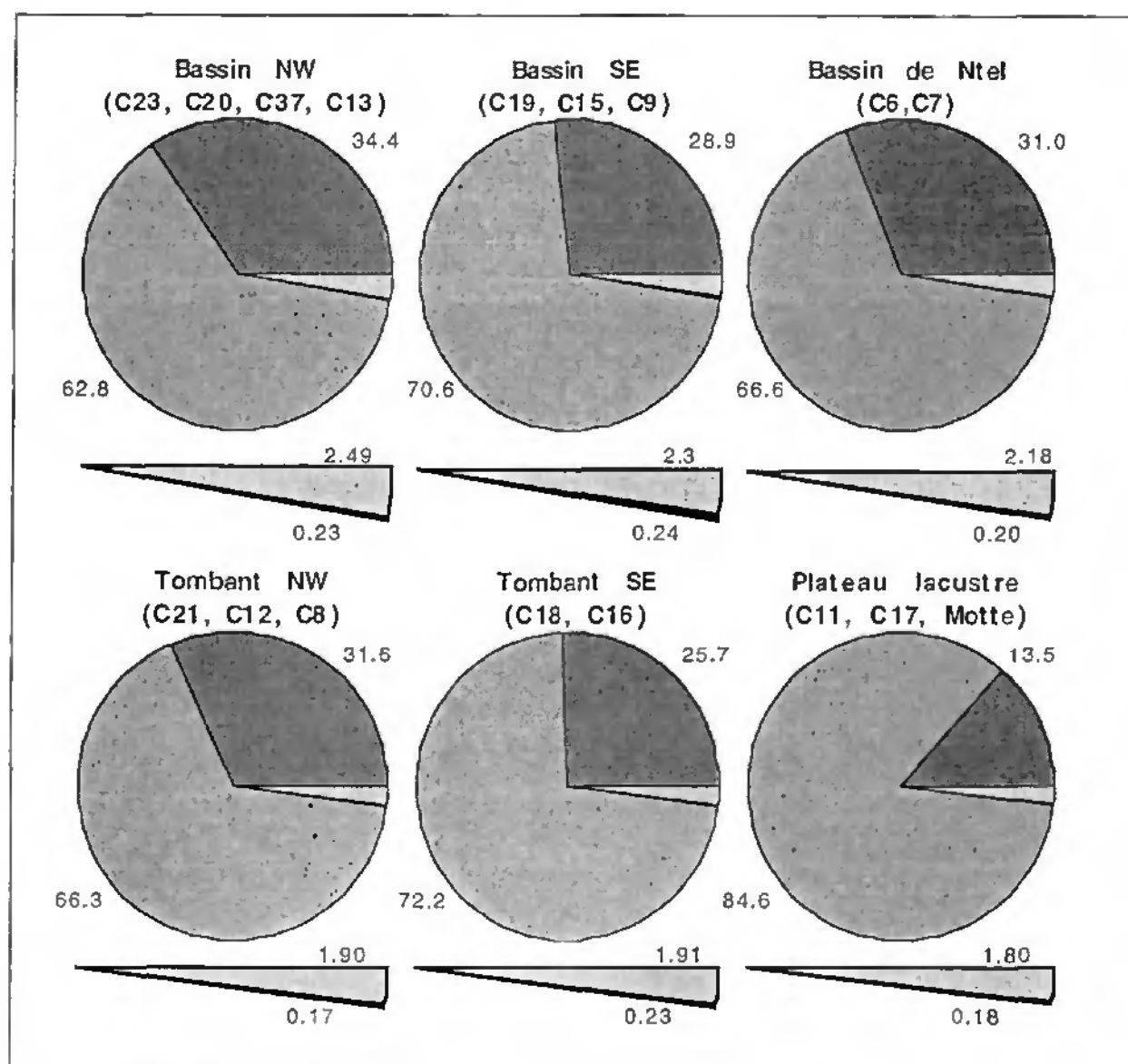


Fig.5.17. Composition du sédiment de surface (0-1cm de profondeur) des différentes zones topographiques du lac de Neuchâtel

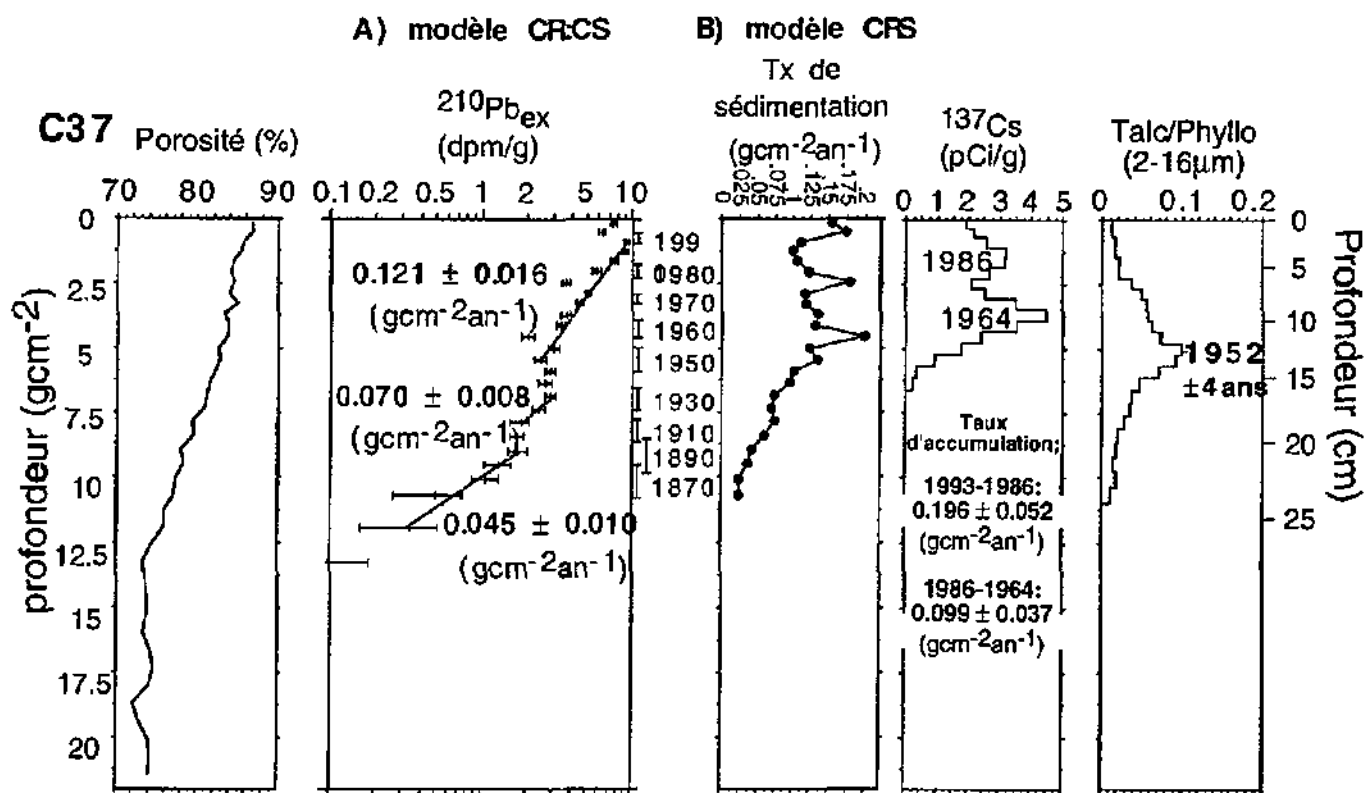


Fig.5.18. Datation et reconstitution des taux d'accumulation de la carotte C37 par les méthodes du Plomb-210 et du Césium-137. Profils de porosité, ²¹⁰Pb_{ex} (plomb-210 en excès), ¹³⁷Cs et [Talc/Phyllo] de la fraction 2-16μm; en A) les taux d'accumulation sont basés sur le modèle CRCS, en B) sur le modèle CRS (cf. commentaires dans le texte)

Taux d'accumulation (mm/ an)

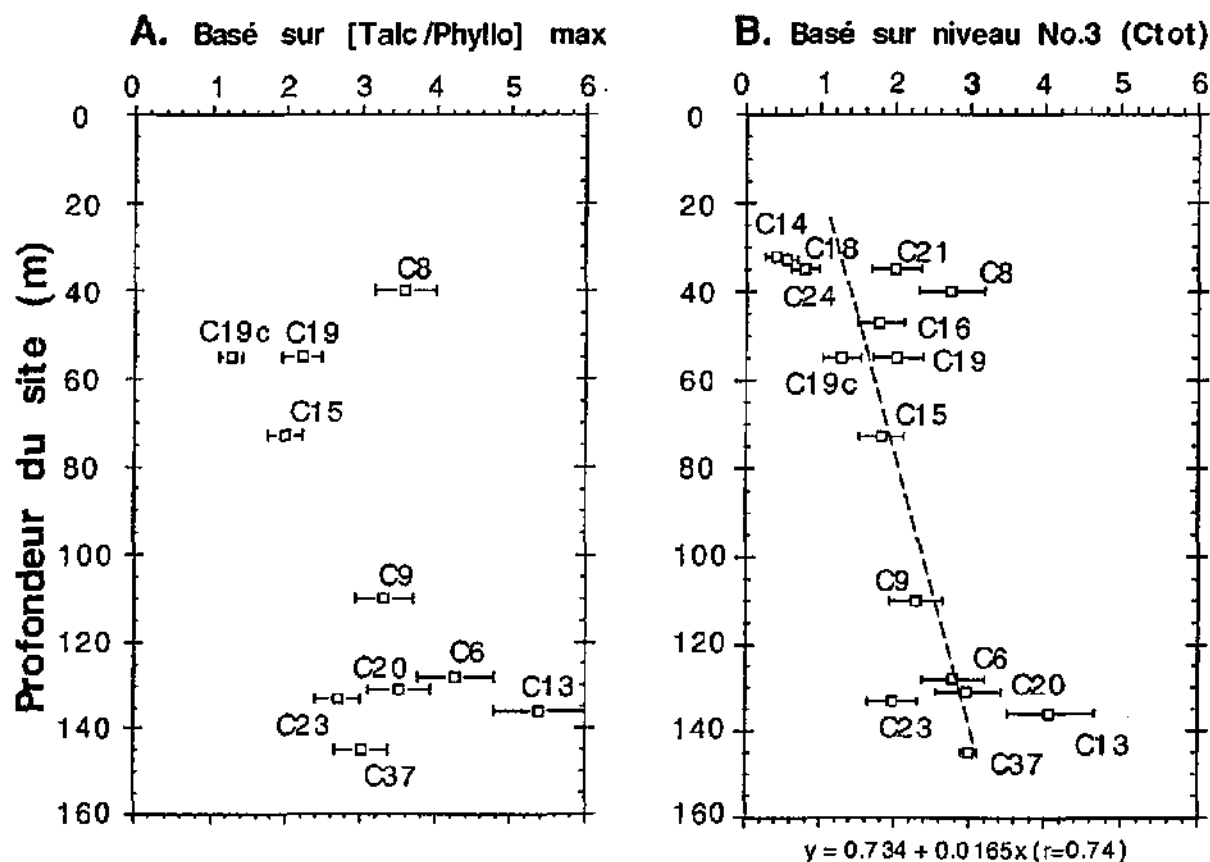
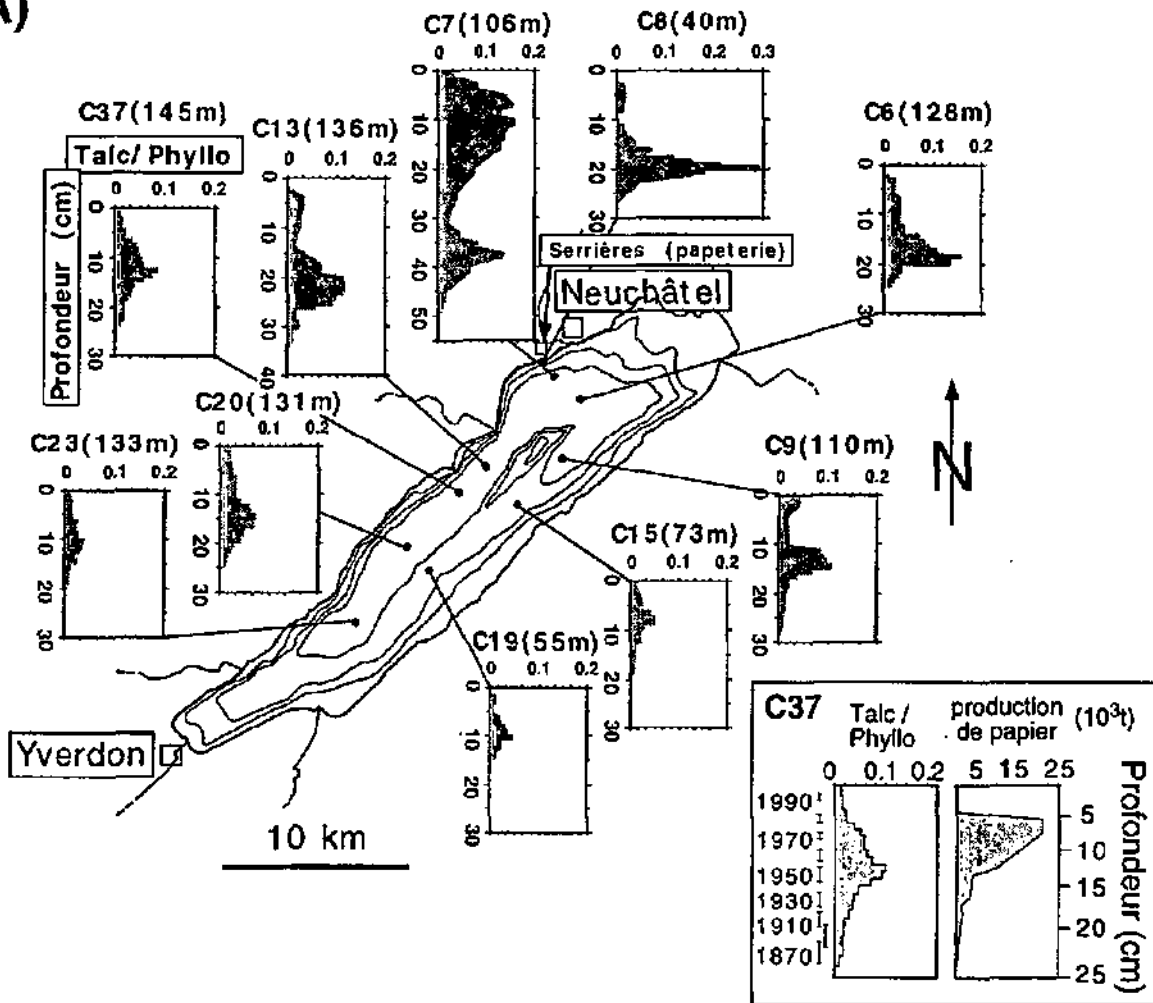


Fig.5.18. Evolution du taux d'accumulation en fonction de la profondeur du site. A) Taux d'accumulation basé sur la profondeur du rapport Talc/Phyllosilicates maximal; B) Taux d'accumulation basé sur la profondeur du niveau de corrélation No.3 dans le profil de teneur en carbone total

A)



B)

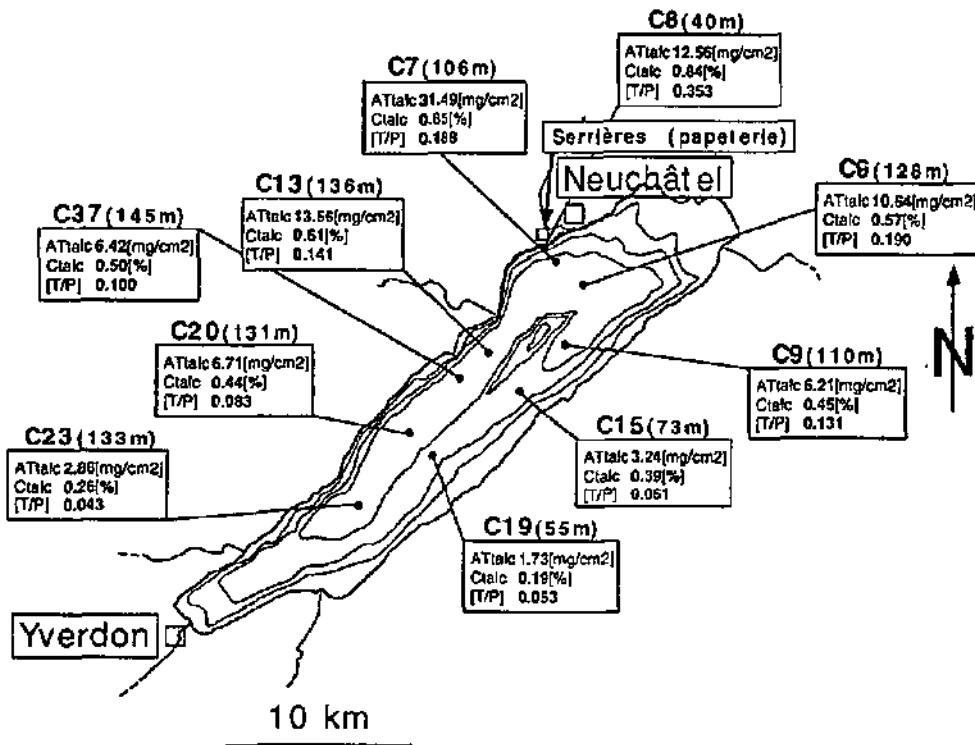


Fig.5.20. A) Profils des rapports Talc / Somme des phyllosilicates [T/P] de la traction 2-16 μ m (intensités RX) et comparaison entre la production de papier à Serrières et le profil [T/P] de C37; B) Accumulation totale de talc (ATalc), concentration en talc (Ctalc) et rapport [T/P] maximal des carottes analysées

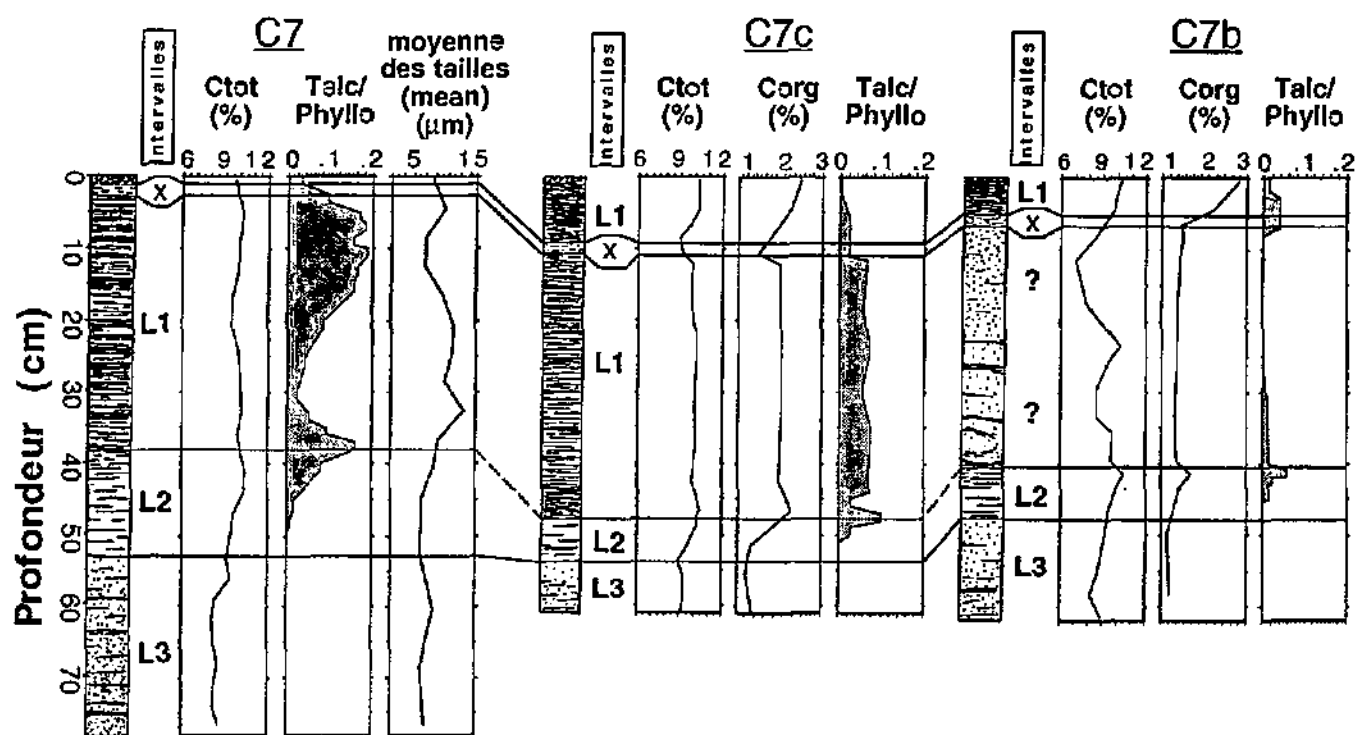


Fig.5.21. Comparaison des profils de [Talc/Phyllo] et de teneur en carbone de trois carottes prélevées sur le même site (C7); les profils de teneur en carbone total sont présentés pour C7c et C7b, de même que la granulométrie de C7; le niveau x, corrélable, est reconnaissable par sa couleur et sa texture

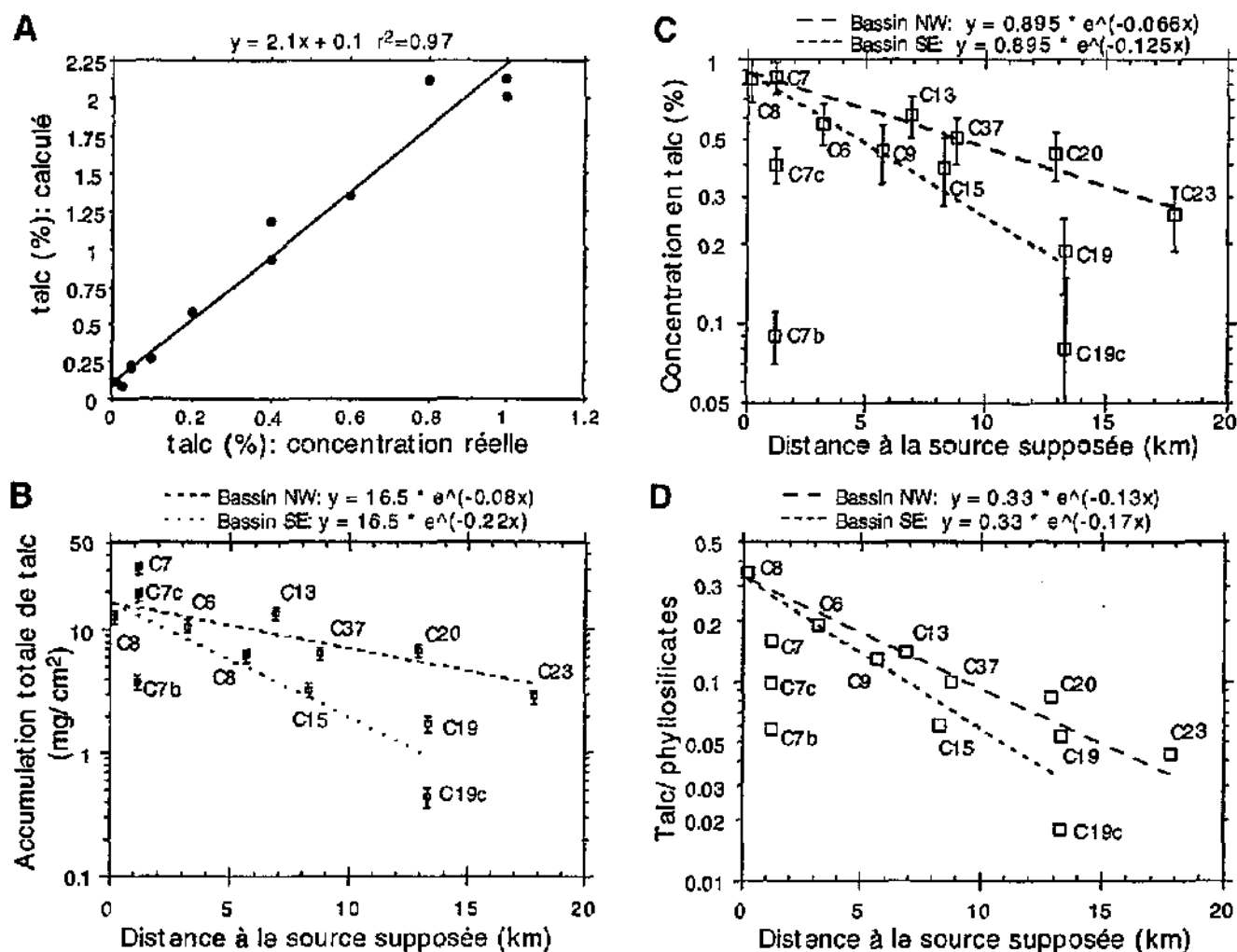


Fig.5.22. A) Comparaison entre concentrations calculées et réelles de talc, B) Evolution de l'accumulation totale de talc avec la distance à la source supposée; C) Idem pour la concentration en talc; D) Idem pour le rapport [Talc/Phyllosilicates] maximal

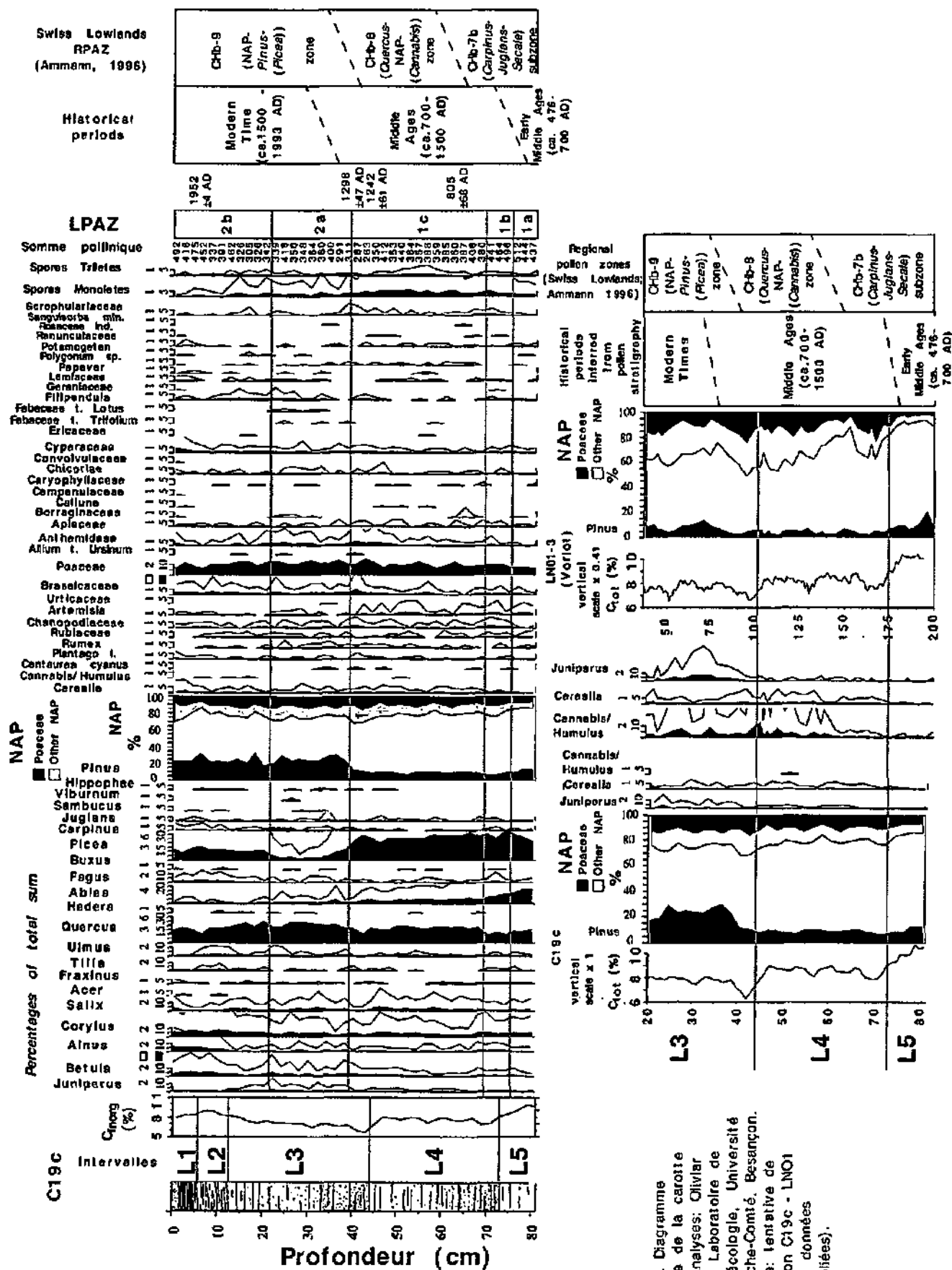


Fig. 5.23. Diagramme pollinique de la carotte C19c: Analyses: Olivier Pueras, Laboratoire de chrono-écologie, Université de Franche-Comté, Besançon. C19c-contre: tentative de corrélation C19c - LNO1 (Madorn, données non publiées).

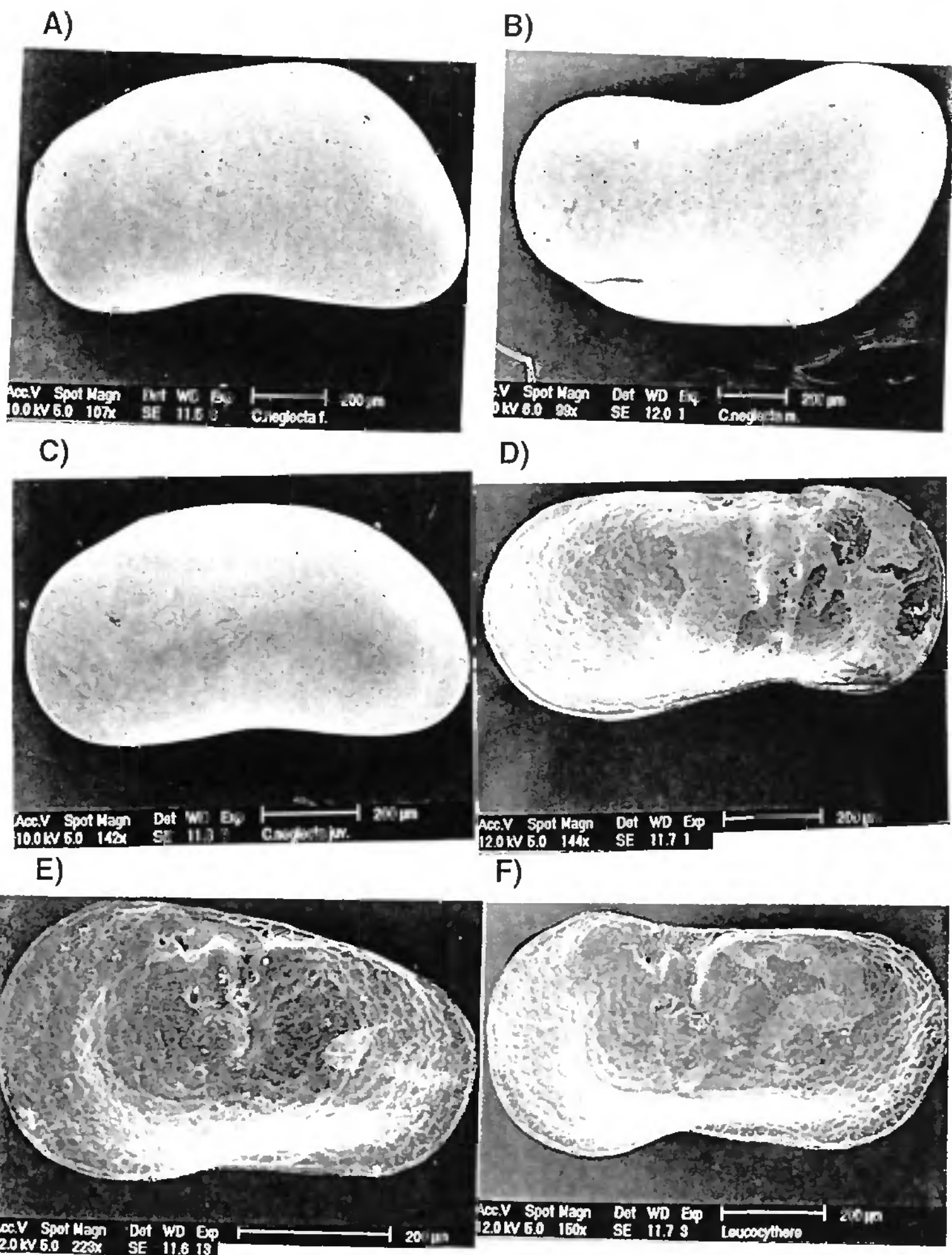
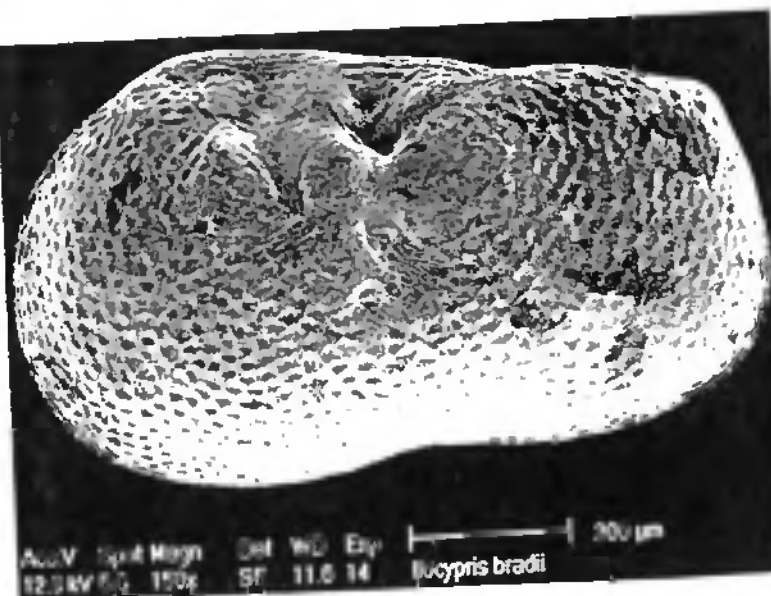


Fig.5.24. Ostracodes fossiles; A) *C. neglecta*, femelle, v.gauche; B) *C. neglecta*, mâle, v.droite; C) *C. neglecta*, juvénile, v.gauche; D) *L. sancti-patricii*, mâle, v.droite; E) *L. mirabilis*, femelle ou *L. sancti-patricii*, juv., v.gauche; F) *L. mirabilis*, mâle, v.gauche

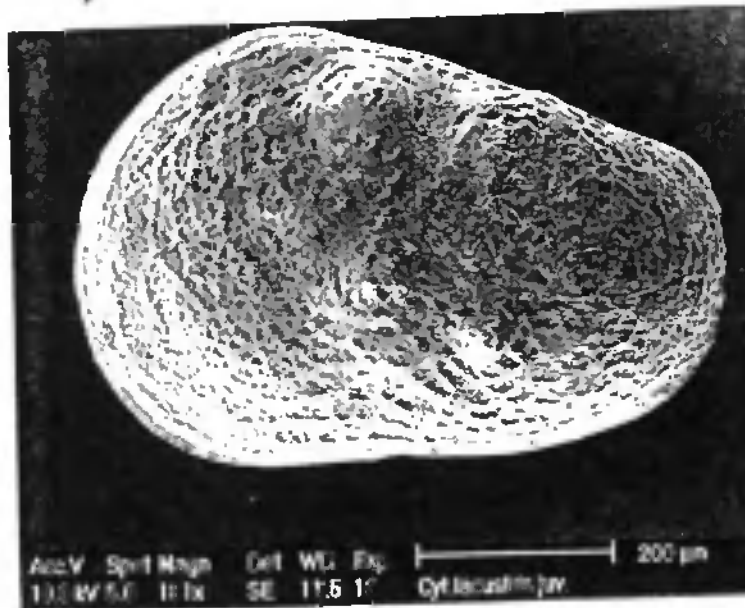
A)



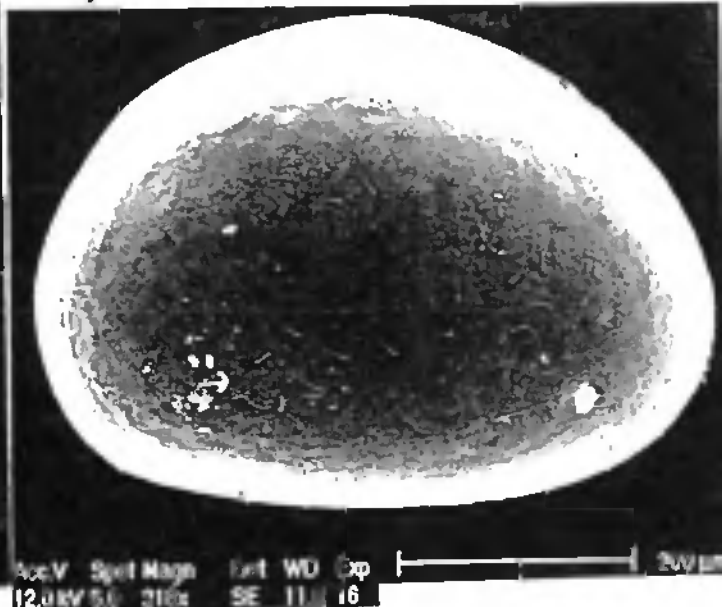
B)



C)



D)



E)



F)

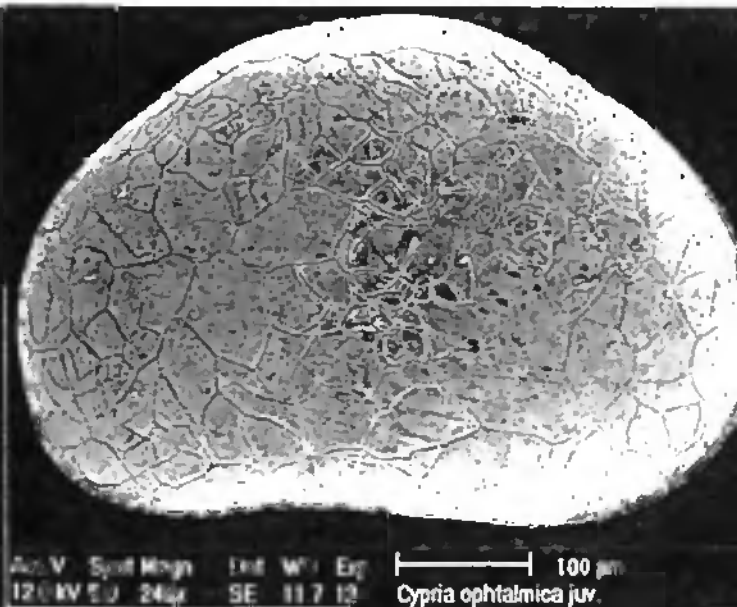
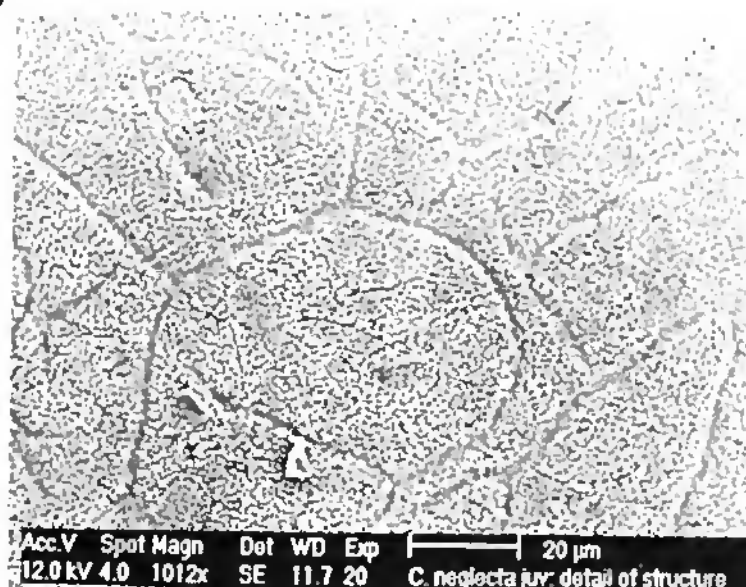
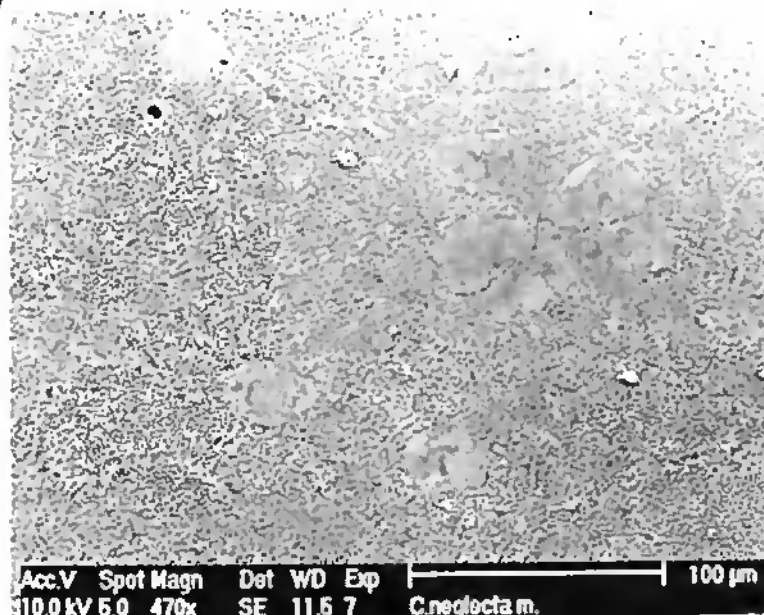


Fig.5.25. Ostracodes fossiles; A) *Ilyocypris bradyi*; B) *Cyt.lacustris*, juvénile, nodes très apparents; C) *Cyt.lacustris*, juvénile, nodes peu apparents; D) *Cyclocypris ovum*, v.droite; E) *Cypria ophtalmica*, v.gauche; F) *C.ophtalmica*, juvénile, v.droite

A)



B)



C)



Fig.5.26. Ostracodes fossiles, détails de la structure; A) *C. neglecta*: réseau résultant d'attaques par les champignons (?); B) *C. neglecta*, détail de la trace externe des points d'attache des muscles; C) *Cyt. lacustris*, détail des pores

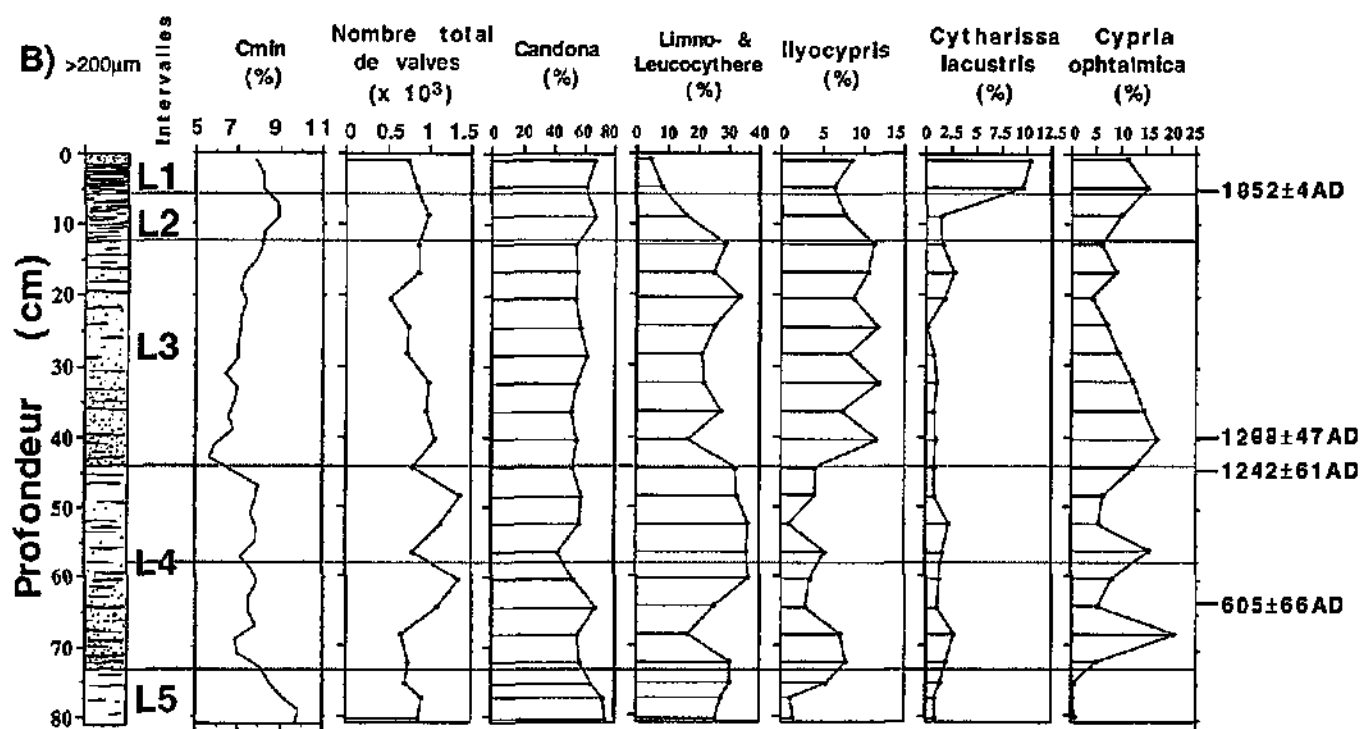
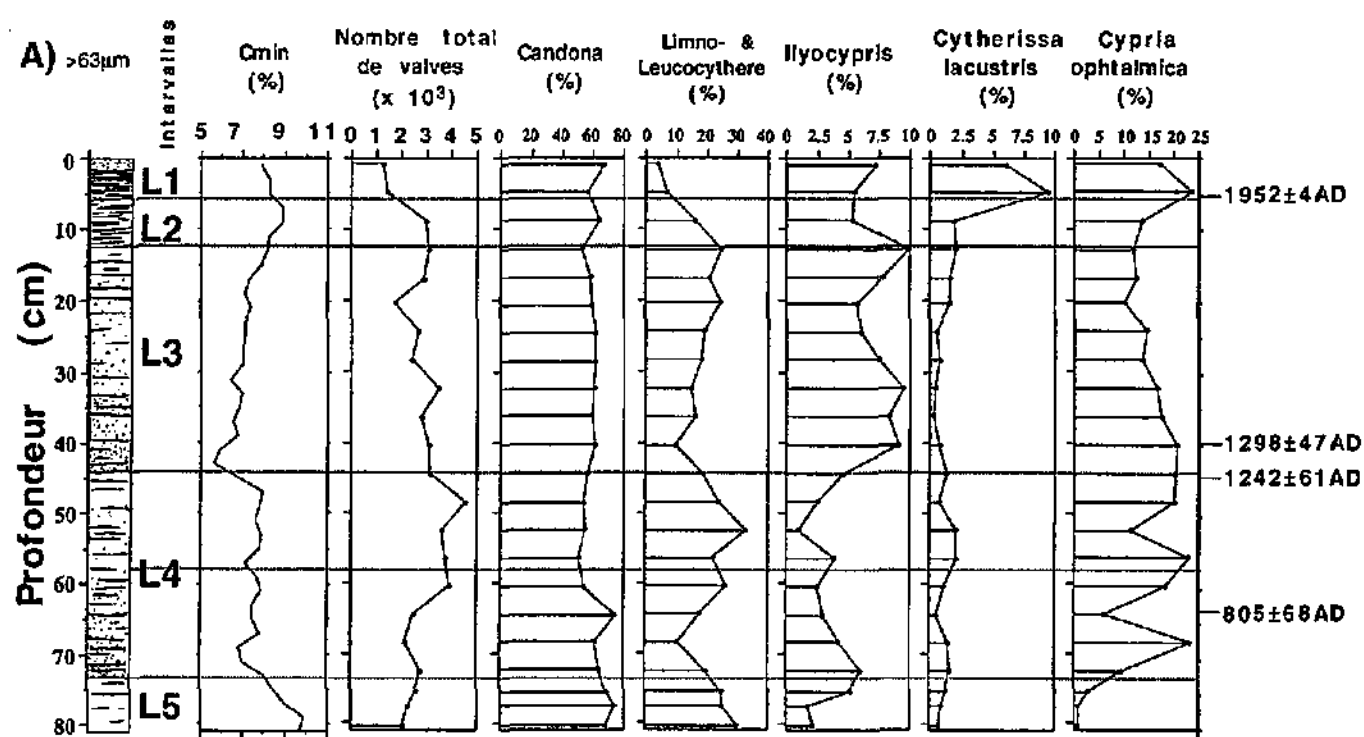


Fig.5.27. Abondance totale et fréquence des différentes espèces d'ostracodes de la carotte C19c; A) Dans la fraction >63µm; B) Dans la fraction >200µm; la ligne traitillée au centre de l'intervalle L4 correspond à la phase de déforestation reconnue dans LN01 (Ph.Hadorn)(cf. commentaires dans le texte); les dates indiquées sont obtenues sur d'autres colonnes sédimentaires et sont placées grâce aux corrélations établies (cf. Fig.5.8.)

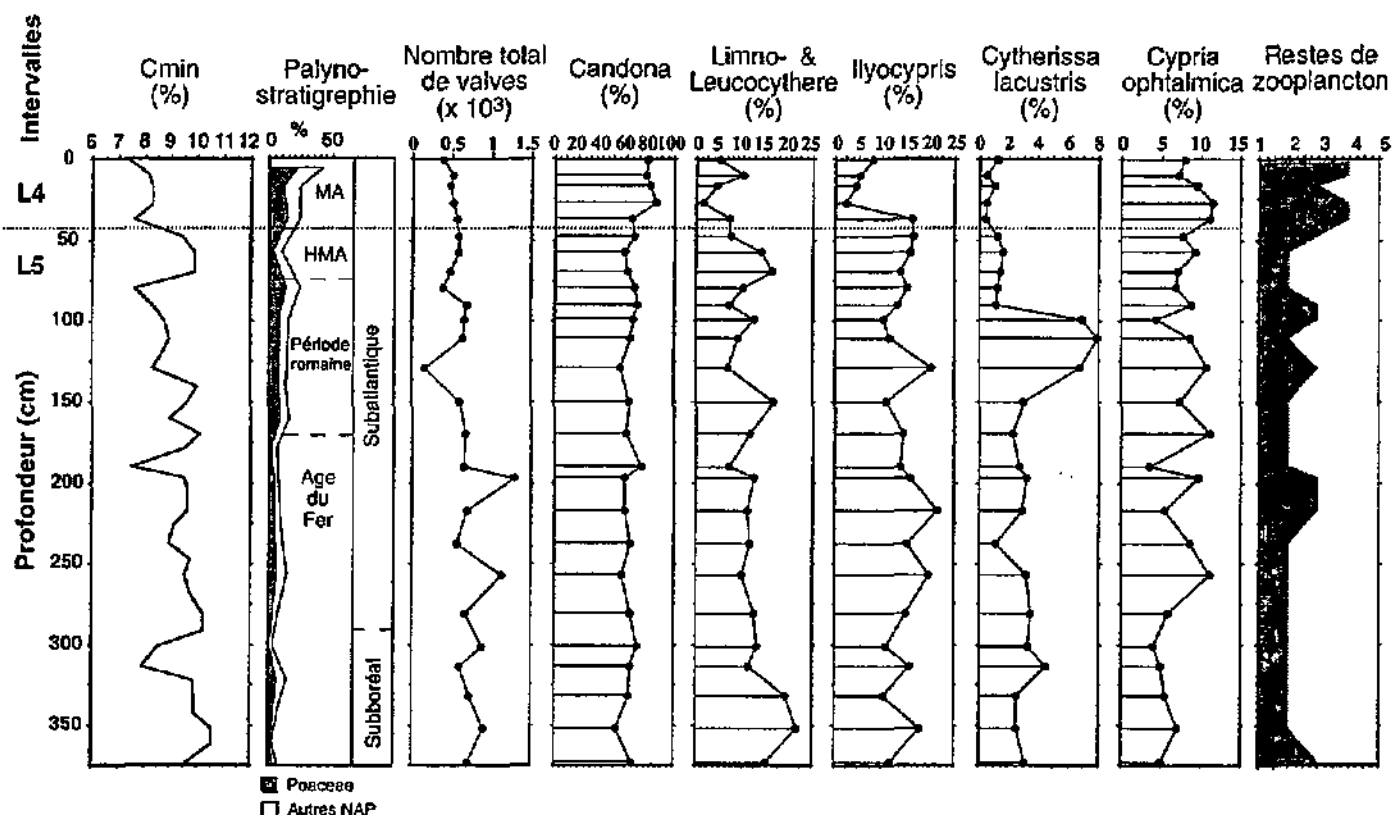


Fig.5.28. Abondance totale et fréquence des différentes espèces d'ostracodes de la carotte LNO1 (Kolbenlot); fraction >200µm; MA: Moyen Age; HMA: Haut Moyen Age (Données de palynologie de Philippe Hadom, modifiées par rapport à Hadom in Schwaib, 1992); Restes de zooplancton: 2: peu abondants; 3: moyennement abondants; 4: très abondants

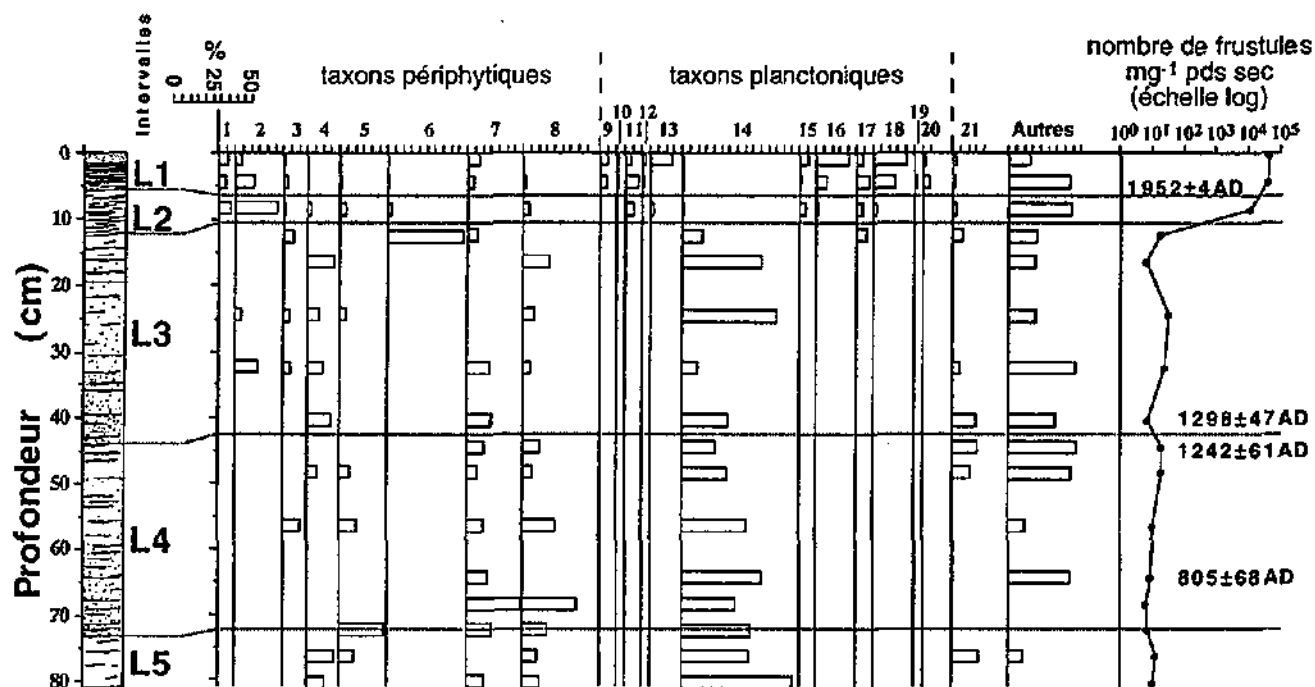


Fig.5.29. Pourcentages des différents taxons de diatomées présents dans le sédiment de lac carotte C15c. De gauche à droite: Taxons péryphytiques: 1) *Achnanthes clevei*, 2) *Amphora pediculus*, 3) *Amphora inariensis*, 4) *Cocconeis placentula* v. *euglypta*, 5) *Cymbella* sp., 6) *Fragilaria construens*, 7) *Fragilaria pinnata*, 8) *Gomphonema angustum*; Taxons planctoniques: 9) *Asterionella formosa*, 10) *Aulacoseira granulata*, 11) *Aulacoseira islandica* subsp. *helvetica*, 12) *Cyclotella comensis*, 13) *Cyclotella cyclopuncta*, 14) *Cyclotella distinguenda*, 15) *Cyclotella cf. krameri*, 16) *Fragilaria crotonensis*, 17) *Stephanodiscus minutulus*, 18) *Stephanodiscus neoastraea*, 19) *Stephanodiscus icnulus*, 20) *Tabellaria fenestrata*; Non spécifié: 21) *Navicula* sp.. Autres diatomées et abondance totale par milligramme de sédiment sec. Analyses effectuées par Jean-Claude Druart, de l'INRA, à Thonon-les-Bains.

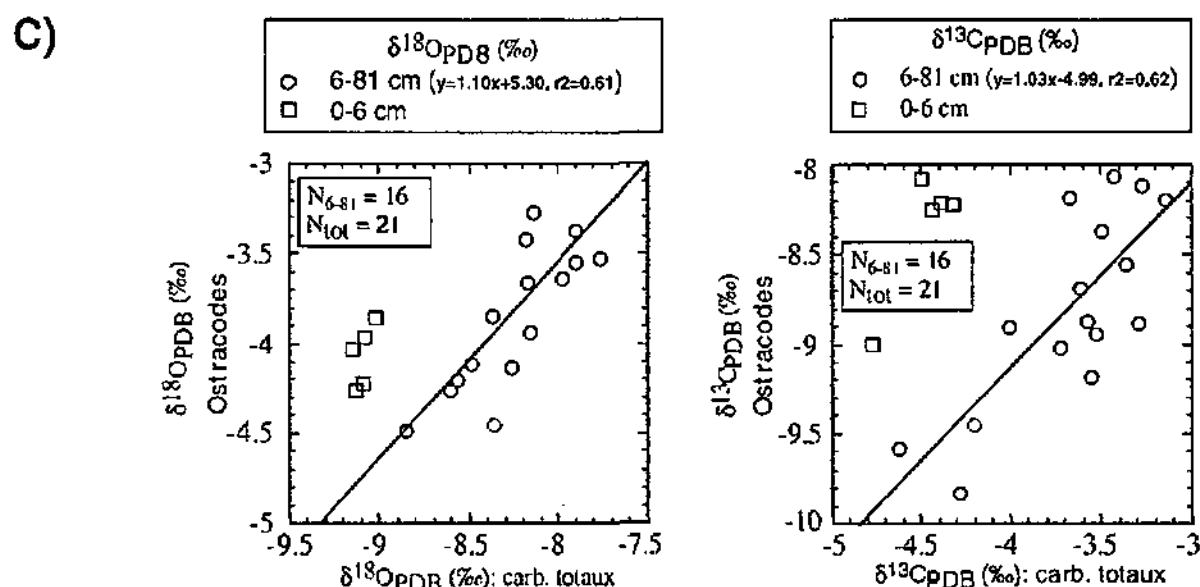
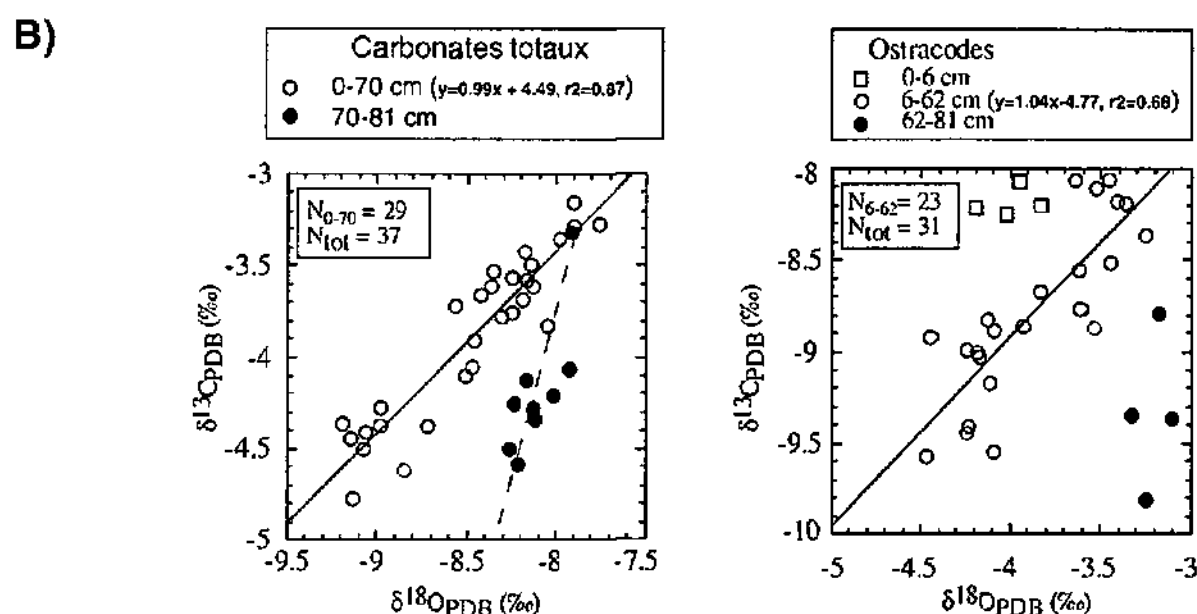
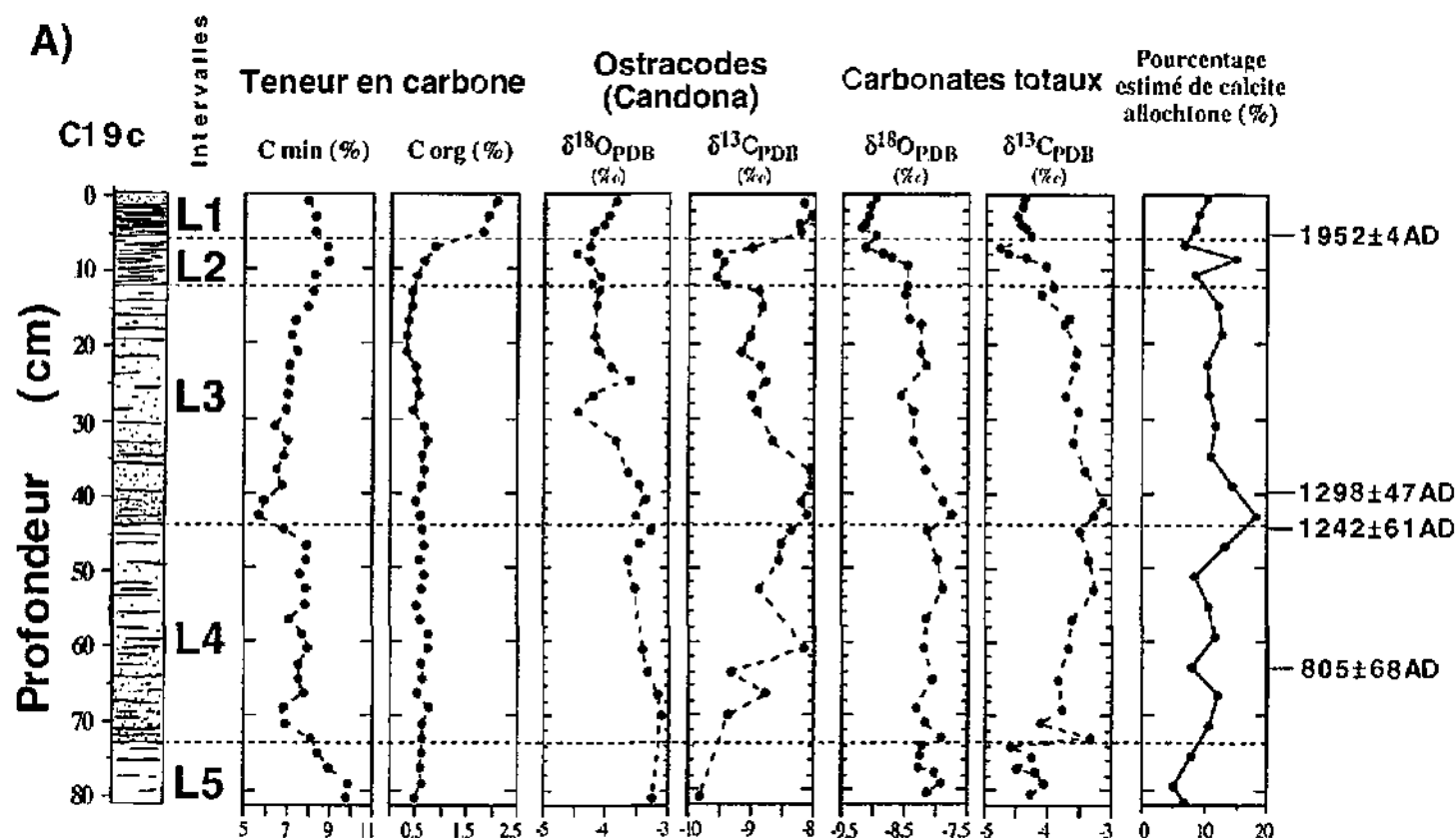


Fig.5.30. A) Résultats isotopiques sur carbonates totaux et valves d'ostracodes de la carotte C19c, comparés aux profils de teneur en carbone et du pourcentage estimé de calcite allochtone; B) Relations $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates totaux et des valves d'ostracodes; C) Relations $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^{18}\text{O}$

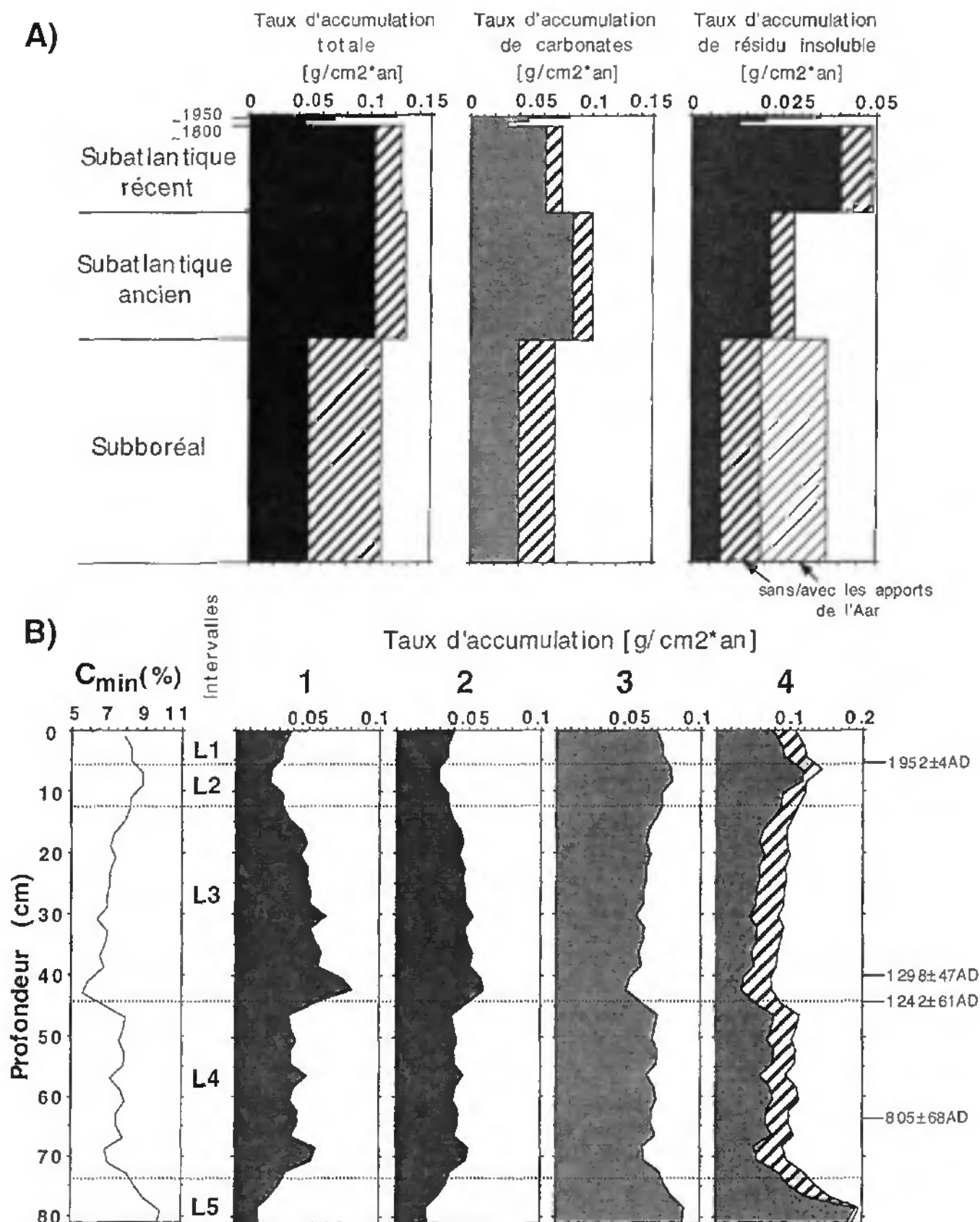


Fig.5.31. A) Taux d'accumulation totale, de carbonates et de résidu insoluble du Subboréal à la période récente, reconstitués à partir de la carotte LN01; la zone hachurée représente l'incertitude de l'estimation, la zone finement hachurée du taux de RI du subboréal représente l'incertitude supplémentaire en tenant compte des apports de l'Aar. B) Taux d'accumulation de la carotte C19c normalisés à la moyenne du taux d'accumulation totale de LN01 au Subatlantique récent; 1) Evolution du taux d'accumulation de résidu insoluble en postulant un taux d'accumulation de carbonates constant; 2) Idem en postulant un taux d'accumulation totale constant; 3) Evolution du taux d'accumulation de carbonates en postulant un taux d'accumulation totale constant; 4) Idem en postulant un taux d'accumulation de résidu insoluble constant, le profil hachuré représentant une estimation tenant compte de la part allochtone des carbonates

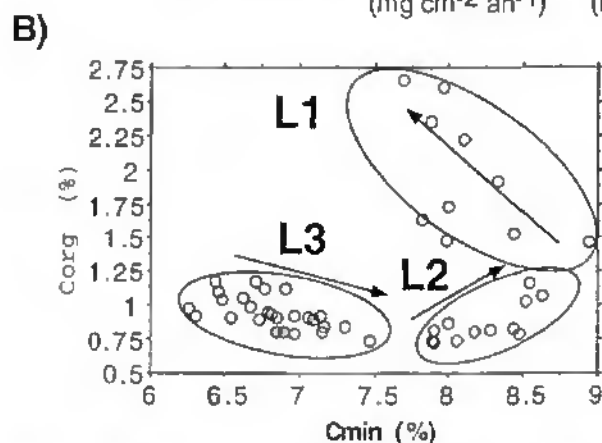
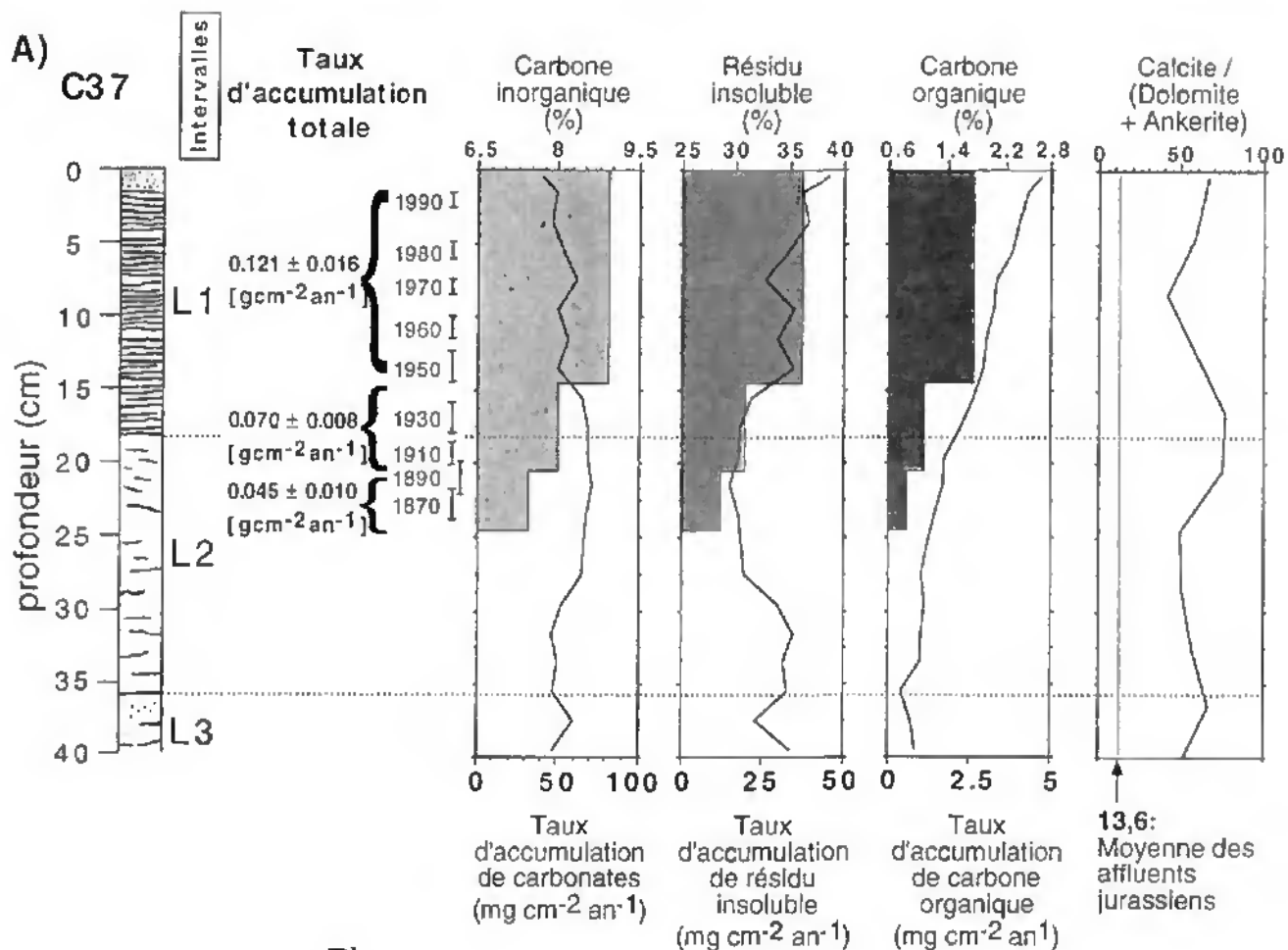


Fig.5.32. A) Profils de teneur en carbone inorganique, résidu insoluble, carbone organique et rapport Calcite/(Ankérite+Dolomite) de la carotte C37; Reconstitution des taux d'accumulation des différentes composantes du sédiment; B) Evolution de la relation carbone organique versus carbone inorganique des intervalles L1 à L3 de C37

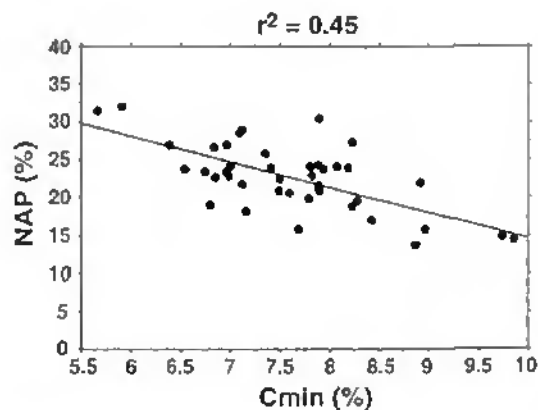


Fig.5.33. Relation entre le pourcentage de pollens non arboréens (NAP) et la teneur en carbone inorganique; Carotte C19c

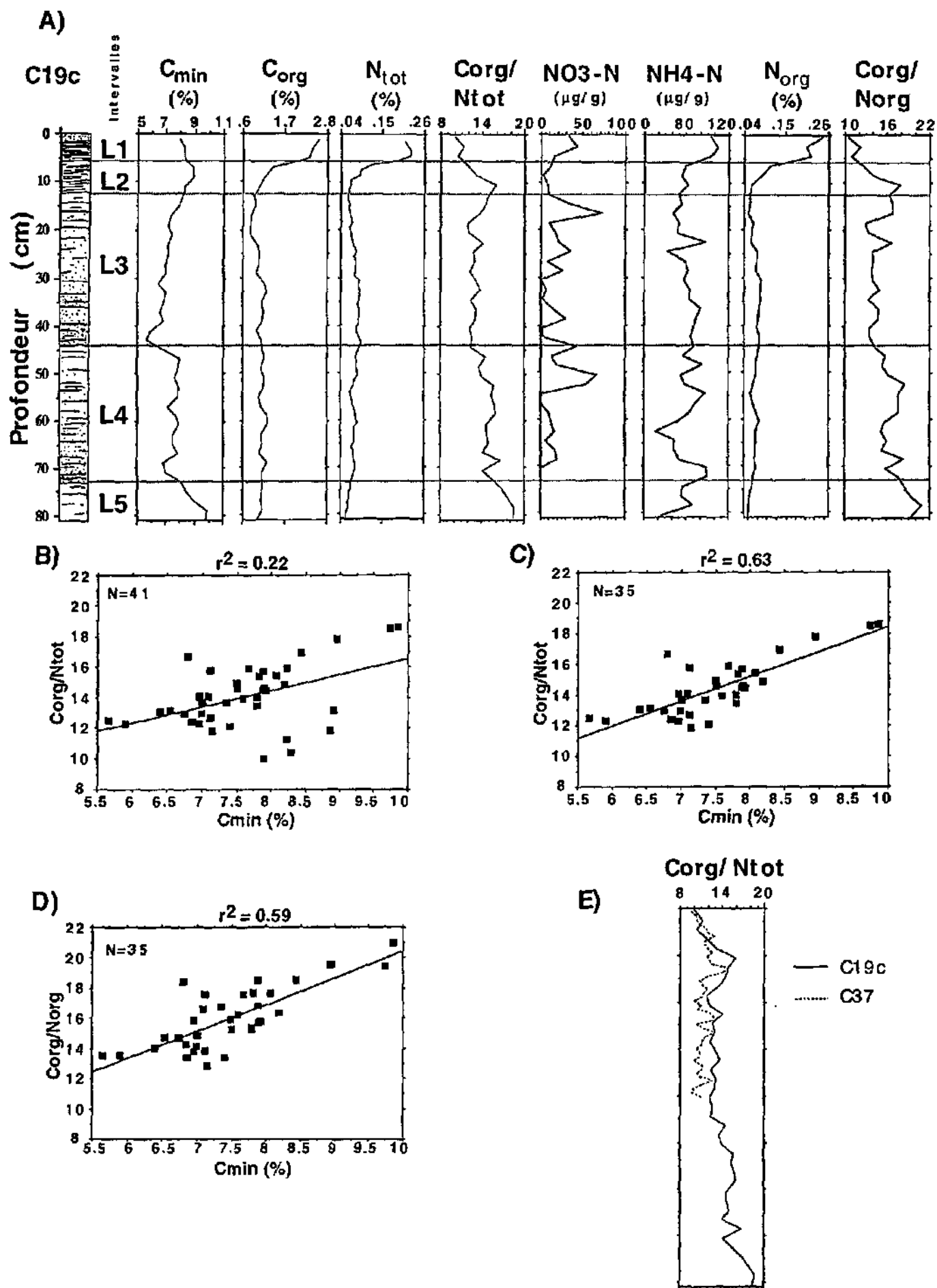


Fig.5.34. A) Distribution des différentes formes du carbone et de l'azote dans la carotte C19c ainsi que rapports C/N; B) C_{org}/N_{tot} versus C_{min} de la carotte C19c; C) Idem en excluant les intervalles L1 et L2; D) C_{org}/N_{org} versus C_{min} de la carotte C19c en excluant L1 et L2; E) Comparaison des profils C_{org}/N_{tot} de C19c et C37 (échelles normalisées: $C37 = 0.41 \cdot C19c$)

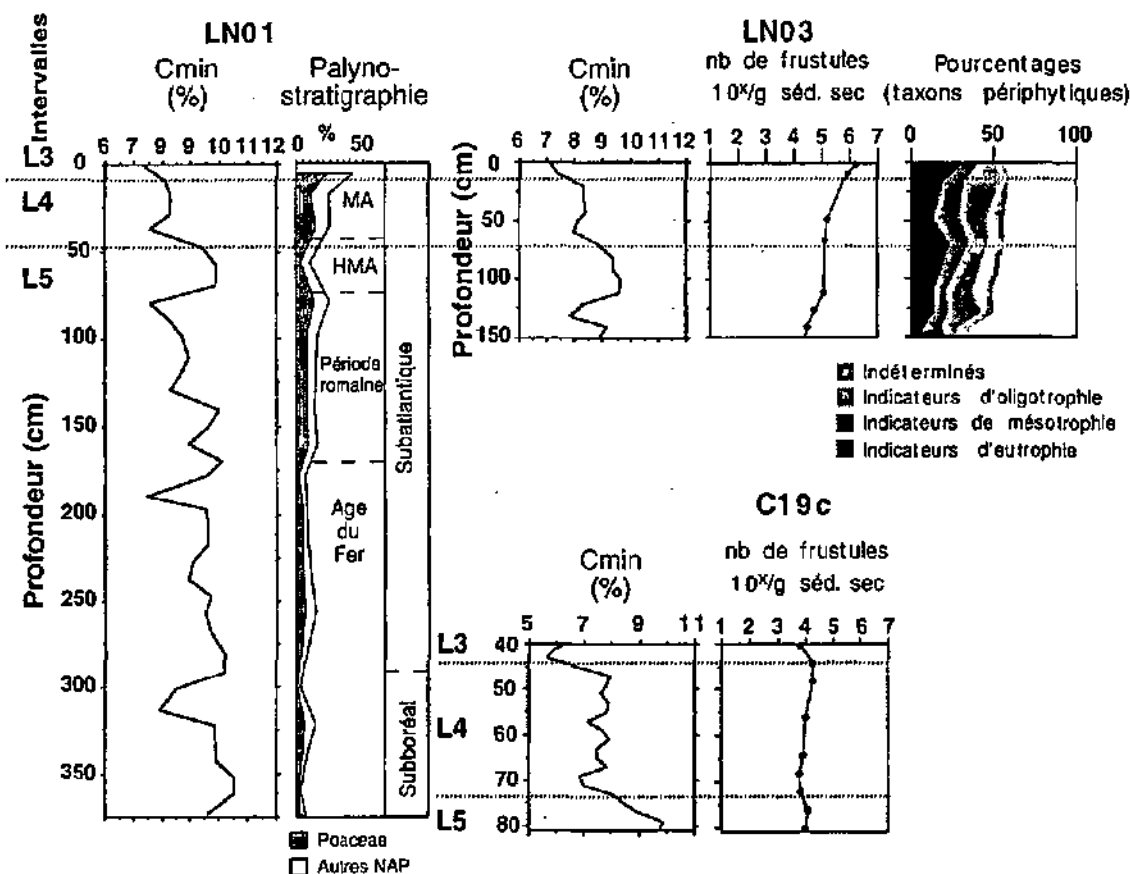


Fig.5.35. Corrélation entre les carottes LN01 et LN03 (Schwab, 1992); Comparaison des teneurs en frustules de diatomées des carottes LN03 et C19c; Indicateurs du niveau de trophie dans LN03, données redessinées d'après Straub (1993)

Fig.5.36. Profil du rapport $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates totaux; A) valeurs mesurées; B-D) profils tenant compte de différentes hypothèses pour le calcul de la proportion de calcite allochtone: B) calcul d'après $(A+D)/(A+D+C)$; C) d'après la composition moyenne des apports allochtones (26.4% de carbonates); D) d'après la composition de l'Areuse (46.1% de carbonates)

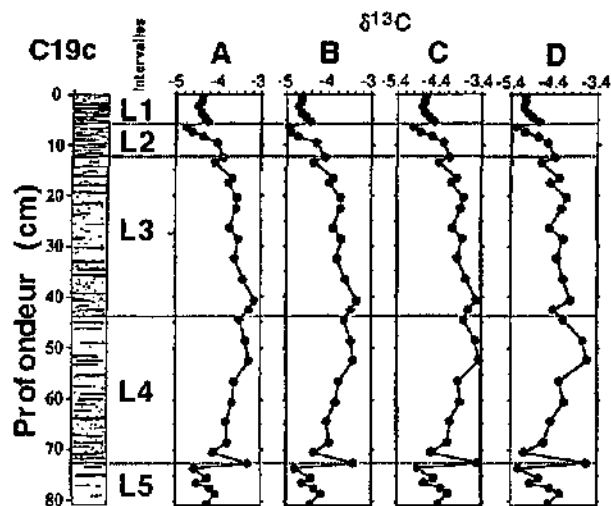
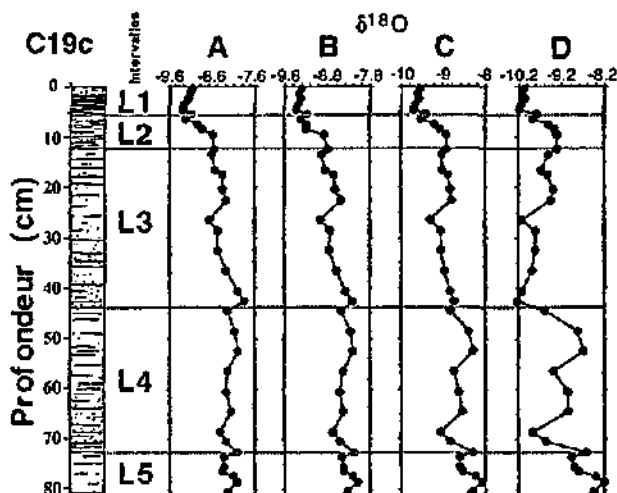


Fig.5.37. Profil du rapport $\delta^{18}\text{O}$ des carbonates totaux; A) valeurs mesurées; B-D) profils tenant compte de différentes hypothèses pour le calcul de la proportion de calcite allochtone: B) calcul d'après $(A+D)/(A+D+C)$; C) d'après la composition moyenne des apports allochtones (26.4% de carbonates); D) d'après la composition de l'Areuse (46.1% de carbonates)



A) Température: estimation de la variation en °C par rapport à la valeur moyenne de la période 1901-1960

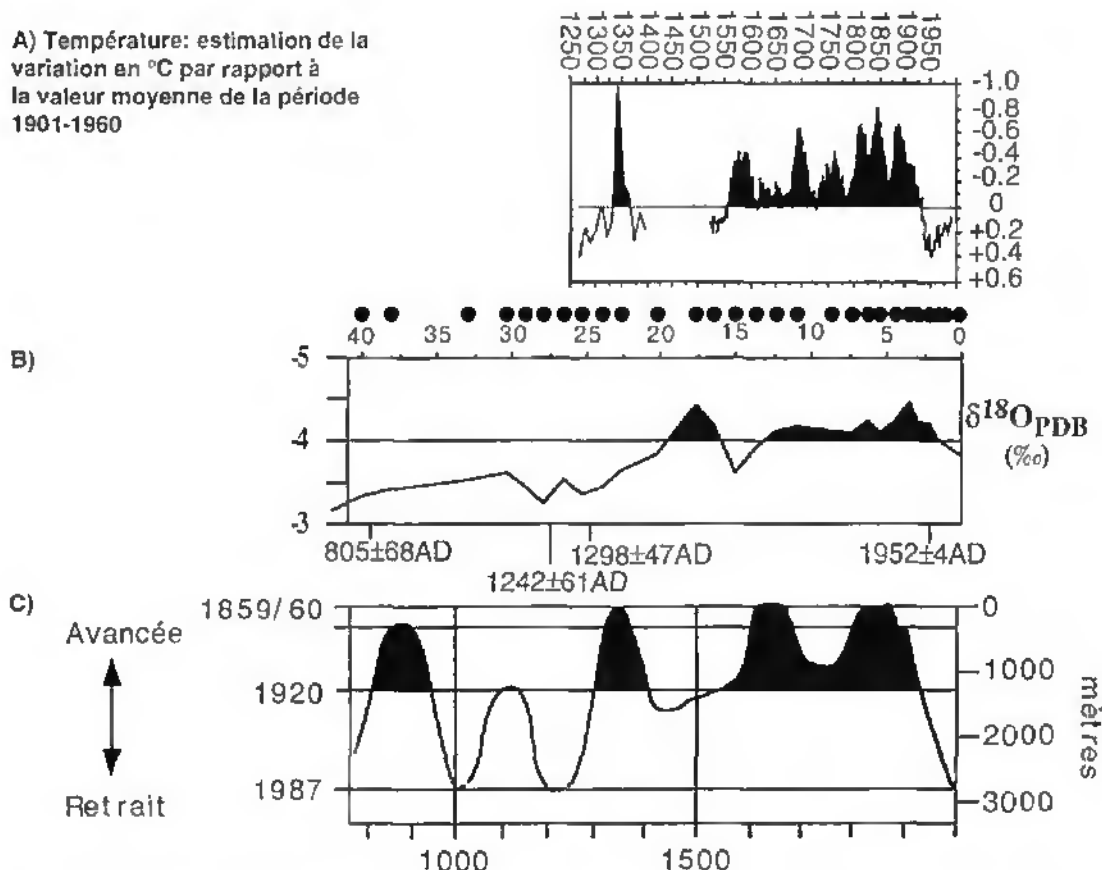


Fig.5.38. Comparaison du profil du $\delta^{18}\text{O}_{\text{C,n}}$ de la carotte C19c (B) avec la reconstitution de la température ambiante d'après des documents historiques (A) et avec les oscillations du glacier d'Aletsch (C). A) Période 1270-1400, Europe centrale (Plister, 1975); Période 1525-1980, Bâle (Plister, 1988), moyenne courante sur 20 ans; B) $\delta^{18}\text{O}_{\text{C,n}}$: échelle horizontale en $[\text{g}/\text{cm}^2]$; les cercles pleins représentent les points d'échantillonnage; les déviations sont indiquées par rapport à -4‰, soit à la moyenne des valeurs de 0-6cm; C) données redessinées d'après Holzhauser, 1988; les déviations sont indiquées par rapport à la position de la langue glaciaire en 1920.

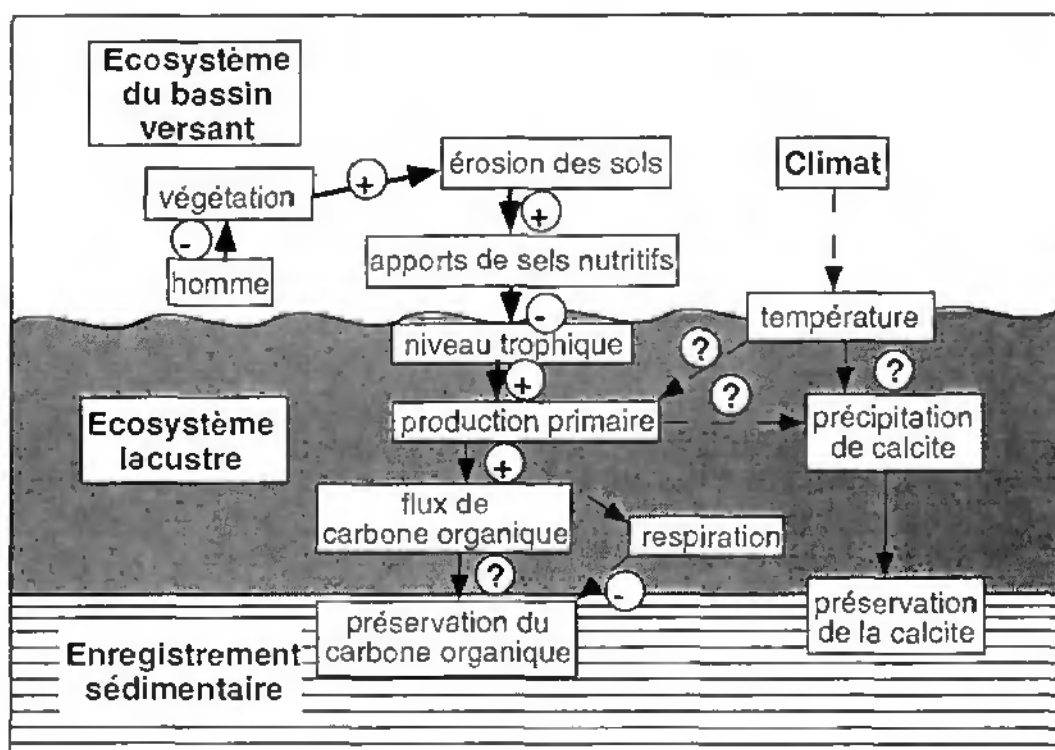


Fig.5.39. Diagramme schématique indiquant les principaux facteurs ayant influencé la formation des sédiments du lac de Neuchâtel durant les 1500 dernières années (cf. texte)

CHAPITRE 6

Conclusions générales

L'évolution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques de l'eau et de la productivité laisse apparaître une influence de l'hydrodynamisme sur la répartition spatiale du phytoplancton, qui tend à s'accumuler dans les zones du lac situées sous le vent. Les ondes internes ont également une incidence non négligeable sur la répartition du phytoplancton. Au sein du domaine pélagique, la variabilité spatiale de la productivité annuelle est faible.

La sédimentation actuelle du lac de Neuchâtel a été étudiée à l'aide de trois stations de pièges à sédiments. La vitesse de chute des particules a été estimée par division des flux sédimentaires par les concentrations des particules en suspension. Elle varie en période stratifiée entre $2,58 \pm 1,11$ [m/j] et $5,74 \pm 2,58$ [m/j] suivant la station et la profondeur dans la colonne d'eau, et entre $3,37 \pm 0,90$ [m/j] et $7,66 \pm 5,06$ [m/j] en période non stratifiée. Les temps de résidence moyens des particules dans la colonne d'eau sont donc de l'ordre de 20 à 40 jours.

En 1993 et 1994, la précipitation de calcite endogénique a débuté fin avril - début mai et s'est prolongée jusqu'en septembre ou octobre. De la calcite endogénique est également récoltée en hiver mais les résultats du rapport $\delta^{18}\text{O}$ sur carbonates totaux montrent que cette calcite est d'origine estivale et qu'elle a été remise en suspension. La précipitation de calcite est activée lors des périodes de forte productivité phytoplanctonique et de température épilimnique élevée. Elle est plus faible lors des phases d'eaux claires. Ceci est probablement dû à la conjonction d'une nucléation hétérogène facilitée et de sursaturations momentanément plus élevées.

Les analyses des isotopes stables du carbone et de l'oxygène, entreprises par M.L. Filippi sur carbonates totaux, ont permis de mettre en évidence la possibilité d'une précipitation en déséquilibre, en relation avec une précipitation rapide qui mène à des tailles plus élevées des calcites ($8\text{--}16\mu\text{m}$) et qui est activée par une forte activité phytoplanctonique.

Les flux sédimentaires laissent apparaître une forte dépendance saisonnière; les 2/3 du flux annuel dans les couches profondes sont enregistrés durant la période automne-hiver, un tiers seulement durant la période printemps-été. Ce schéma saisonnier est dû à l'influence de resuspensions du sédiment, qui sont sensibles avant tout en automne et en hiver. Les pourcentages estimés de particules d'origine resuspensive dans le total du matériel récolté à proximité du fond sont de 23% au printemps et en été et de 71% en automne-hiver à la station profonde au large de Chez-le-Bart (125m), soit 54% en moyenne annuelle. Aux stations situées sur les tombants, ces pourcentages passent de 24-48% au printemps et en été à 82-92% en automne-hiver, ou encore 64-78% en moyenne annuelle.

Les flux nets annuels estimés s'établissent à $0,082$ [g/cm²*an] à la station profonde de Chez-le-Bart, $0,080$ [g/cm²*an] à la station de Cortaillod et $0,060$ [g/cm²*an] à la station de Chevroux et correspondent bien aux taux d'accumulation totale de ces mêmes stations pour la période 1952-1993, reconstitués d'après analyse des carottes courtes, soit respectivement $0,099$ [g/cm²*an], $0,084$ [g/cm²*an] et $0,063$ [g/cm²*an].

L'état de la stratification thermique est déterminant quant à la localisation et à l'intensité de la resuspension. En été la zone sujette à la resuspension est presque exclusivement limitée aux parties peu profondes du lac. Cette zone s'étend en début d'automne aux tombants, période durant laquelle les flux resuspensifs et donc probablement les courants sont maximaux au niveau des tombants. En fin d'automne la zone sujette à la resuspension s'étend à la plaine profonde où l'activité se poursuit durant l'hiver. L'établissement de la stratification printanière provoque rapidement une forte diminution de l'importance de la resuspension.

Les coefficients de diffusion verticale ont été déduits des profils des flux resuspensifs, en postulant un état stationnaire. A la station profonde de Chez-le-Bart, ils évoluent de $2,19$ [cm²/s] en été à $10,5$ [cm²/s] en automne et à $70,9$ [cm²/s] en hiver. Ils rediminuent au printemps à $14,1$ [cm²/s]. Les différences observées entre ces estimations et les coefficients de diffusion verticale déduits de la méthode du budget de chaleur proviennent probablement du fait qu'un état stationnaire n'est pas réalisé au niveau de la répartition des particules dans la colonne d'eau.

L'existence d'un régime préférentiel de circulation hydrodynamique est postulée. Il se manifeste par un courant de downwelling le long du talus sud-est et d'upwelling le long du talus nord-ouest. Ce régime préférentiel serait dû à la prépondérance du vent d'ouest et il entraîne une distribution particulière des particules, en favorisant leur transport vers la surface dans le bassin nord-ouest et empêchant dans une certaine mesure ce transport dans le bassin sud-est.

Le bilan des flux sédimentaires ainsi que l'étude de la turbidité des eaux permettent de conclure qu'une partie importante voire prépondérante de la resuspension est originaire de redistributions locales plutôt que d'un transfert latéral depuis la berge lacustre. L'influence du mélange hivernal complet apparaît

constituer le facteur dominant dans la redistribution des particules. Le focusing semble donc être principalement gouverné par les courants de fond dans le lac de Neuchâtel.

Le taux d'accumulation récente dans le lac de Neuchâtel, reconstitué grâce aux méthodes du ^{137}Cs et du ^{210}Pb et aux corrélations entre les différentes carottes, est dépendant de la profondeur d'eau ainsi que de variations spatiales du focusing de sédiment, elles-mêmes probablement à relier à l'influence des courants profonds sur la remise en suspension et sur la répartition du sédiment.

Les teneurs élevées en talc et en kaolinite qui apparaissent de manière associée dans les sédiments du lac de Neuchâtel sont reliés à l'activité d'une ancienne papeterie située à Serrières, près de Neuchâtel. Les différentes estimations de l'accumulation du talc laissent apparaître une diminution de type exponentiel avec la distance à la source supposée, diminution toutefois plus forte en direction du bassin SE qu'en direction du bassin NW du lac, ce qui est probablement imputable à l'obstacle à la dispersion des particules constitué par la dorsale de "la Motte", qui sépare les deux bassins.

L'analyse pollinique détaillée du sédiment depuis 1500BP laisse apparaître deux phases majeures d'impact anthropique sur la végétation, la première à la fin du Haut Moyen Age vers 600-700AD et la seconde durant le Moyen Age, vers 1200-1500AD. Les influences de la modification de la couverture végétale sur l'écosystème lacustre se manifestent par une augmentation générale du taux de sédimentation de résidu insoluble du Subboréal ($0.008\text{--}0.034[\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{an}]$) au Subatlantique récent ($0.041\text{--}0.050[\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{an}]$). La corrélation entre les teneurs minimales en carbonates et les phases de déforestation, ainsi que les évidences d'un changement majeur dans la valeur du rapport $\delta^{13}\text{C}$ du DIC amené au lac laissent à penser que les défrichements ont provoqué une érosion accrue des sols; la modification des assemblages d'ostracodes et l'augmentation d'indicateurs d'eutrophie dans les restes de diatomées nous amènent à postuler que l'érosion accrue des sols a provoqué une perturbation de l'écosystème lacustre par une augmentation des apports de sels nutritifs au lac et probablement une légère augmentation de la productivité primaire.

Une accélération récente de l'eutrophisation est observée. Elle a débuté au siècle passé déjà et se manifeste par une augmentation du flux de carbone organique, par l'apparition de nouveaux taxons de diatomées indicateurs de milieux eutrophes ainsi que par une augmentation de la minéralisation dans l'hypolimnion indiquée par l'évolution vers des valeurs plus négatives du rapport $\delta^{13}\text{C}$ des valves d'ostracodes. L'augmentation de la taille des calcites endogéniques est également reliée à l'augmentation récente de l'eutrophisation, avec probablement des vitesses de cristallisation rapides entraînées par des sursaturations plus élevées.

Les analyses des isotopes stables de l'oxygène sur valves d'ostracodes et sur carbonates totaux laissent apparaître une modification de la composition locale de l'eau du lac entre 1300 et 1500AD, avec une diminution de l'ordre de 0.7‰ des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ des ostracodes. Cette évolution nous permet de postuler une diminution de la température moyenne de l'air de l'ordre de 1 à 1.5°C à la transition entre l'Optimum Climatique Médiéval et le Petit Age Glaciaire.

Une tendance vers des valeurs plus négatives du $\delta^{18}\text{O}$ et du $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates totaux s'observe en concordance avec l'augmentation récente de l'eutrophisation, tendance qui est absente au niveau du rapport $\delta^{18}\text{O}$ des valves d'ostracodes. Cette évolution est interprétée comme étant due à une précipitation en déséquilibre de la calcite endogénique, à relier probablement avec des vitesses de cristallisation élevées.

Références bibliographiques

- Adatte, T. 1988: Etude sédimentologique, minéralogique, micropaléontologique et stratigraphique du Berriasien-Valanginien du Jura central. Ph.D. Thesis, Université de Neuchâtel.
- Adatte, T. & Rumley, G. 1984: Microfaciès, micropaléontologie, minéralogie, stratigraphie, et évolution des milieux de dépôts de la plate-forme berriasio-valanginienne des régions de Ste-Croix, Cressier et du Landcron (NE). Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 107, 221-339.
- Alexandre, P. 1987: Le Climat en Europe au Moyen Age. Ecole des Hautes Ecoles en Sciences Sociales, Paris.
- Allen, T. 1990: Particle size measurements. Chapman & Hall, London, 806 p.
- Ammann, B. 1988: Palynological evidence of prehistoric anthropogenic forest changes on the Swiss Plateau. Studies in the Late Quaternary of Lobsigensee 16. In: The Cultural Landscape - Past, Present and Future (Ed. by Birks, H.H., Birks, H.J.B., Kaland, P.E. & Moe, D.). Cambridge University Press, 289-299.
- Ammann, B. 1994: Differential flotation of sacculate pollen - a nuisance and a chance. Dissertationes Botanicae 234, 101-110.
- Ammann, B., Haeblerli, W., Kühne, A., Merki, R., Presler, J., Schälchli, U. & Wohlfarth, B. 1990: Landschaftsentwicklung im Seeland seit der letzten Eiszeit - Modelle und Realität. In: Fachtagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, Fribourg.
- Andree, M., Oeschger, H., Siegenthaler, U., Riesen, T., Moell, M., Ammann, B. & Tobolski, K. 1986: ^{14}C dating of plant macrofossils in lake sediment. Radiocarbon 28, 411-416.
- Aravena, R., Warner, B.G., MacDonald, G.M. & Hanf, K.I. 1992: Carbon isotope composition of lake sediments in relation to lake productivity and radiocarbon dating. Quat. Res. 37, 333-345.
- Arliztegui, D. & McKenzie, J.A. 1995: Hydrogen index (HI) and its reliability characterising lacustrine sedimented organic matter: a water column/sediment comparison. In: The First International Limno-geological Congress: Research and research methods in ancient and modern basins, Copenhagen, p.8.
- Arthur, M.A. 1983: Stable isotopes in sedimentary geology. In: SEMP Short Course, Dallas.
- Aubert, D. 1975: L'évolution du relief jurassien. Eclogae geol. Helv. 68, 1-64.
- Aucour, A.-M., Hillaire-Marcel, C. & Bonneville, R. 1994: Late Quaternary Biomass Changes from ^{13}C Measurements in a Highland Peatbog from Equatorial Africa (Burundi). Quat. Res. 41, 225-233.
- Bapst, A. 1987: Le lac de Neuchâtel: Physico-chimie et Turbidimétrie des Eaux. Concentration, Minéralogie et Granulométrie des particules en Suspension. Ph.D. Thesis, Université de Neuchâtel.
- Bapst, A. & Kübler, B. 1987: Evolution estivale de la turbidité dans le Lac de Neuchâtel. Schweiz. Z. Hydrol. 49, 1-15.
- Bastin, B. & Coûteaux, M. 1966: Application de la méthode Frenzel à l'extraction des pollens de sédiments archéologiques pauvres. L'Anthropologie 70, 201-203.
- Beck, C. 1987: Etude des composés humiques et essais de caractérisation de la matière organique dans les sédiments récents (post-glaciaires) du lac de Neuchâtel. Ph. D., Université de Neuchâtel.
- Behrehehni, A.-R. 1987: Sedimentations- und Klimageschichte des Spär- und Postglazials im Bereich des Nördlichen Kalkalpen (Salzkammergutsee, Österreich). In: Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie, 120.
- Bengtsson, L., Hellström, T. & Bakoczi, L. 1990: Redistribution of sediments in three Swedish lakes. Hydrobiologia 192, 167-181.
- Benson, L.V., Meyers, P.A. & Spencer, R.J. 1991: Change in the size of Walker Lake during the past 5000 years. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 81, 189-214.
- Berglund, B.E. 1973: Pollen dispersal and deposition in an area of Southeastern Sweden - some preliminary results. In: Quaternary Plant Ecology (Ed. by Birks, H.J.B. & West, R.G.). 117-130.
- Besson, O. 1991: Quelques remarques sur les ondes internes dans le lac de Neuchâtel. (Rapport non publié). Institut de Mathématiques de l'Université de Neuchâtel.
- Besson, O. & Zuur, E. 1992: Simulation numérique des courants dans le Lac de Neuchâtel. (Rapport non publié). Institut de Mathématiques de l'Université de Neuchâtel.
- Bircher, W. 1982: Klima- und Gletschergeschichte des Saastales: Glazialmorphologische und dendroklimatologische Untersuchungen. Physikalische Geographie 9.
- Blanc, P., Pelletier, J.-P. & Moille, J.-P. 1993: Variabilité spatiale et temporelle des paramètres physico-chimiques et biologiques dans l'eau du Léman, campagnes 1991 et 1992. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut. Campagne 1992, 113-162.
- Bloesch, J. 1982: Inshore-Offshore Sedimentation Differences Resulting from Resuspension in the Eastern Basin of Lake Erie. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 39, 748-759.
- Bloesch, J. & Burns, N.M. 1980: A critical review of sediment trap technique. Schweiz. Z. Hydrol. 42, 15-55.
- Bloesch, J. & Sturm, M. 1986: Settling flux and sinking velocities of particulate phosphorus and particulate organic carbon in Lake Zug, Switzerland. In: Sediment and Water Interactions (Ed. by Sly, P.). Springer, 481-490.
- Bloesch, J. & Uehlinger, U. 1986: Horizontal sedimentation differences in a eutrophic Swiss lake. Limnol. Oceanogr. 31, 1094-1109.
- Bonny, A.P. & Allen, P.V. 1984: Pollen recruitment to the sediments of an enclosed lake in Shropshire, England. In: Lake Sediments and Environmental History (Ed. by Haworth, E.Y. & Lund, J.W.G.). University of Minnesota Press, Minneapolis, 231-259.
- Bordovskiy, O.K. 1965: Accumulation and transformation of organic substances in marine sediments. Marine Geol. 3, 3-114.

- Bowman, T.E. & Abele, L.E. 1982: Classification of the recent Crustacea. In: The biology of Crustacea (Ed. by Abele, L.G.). Vol.1: systematics, the fossil record, and biogeography. Academic Press, New York, 221-239.
- Brochier, J.-L. 1986: La séquence sédimentaire lacustre. Archéol. neuchâteloise 4, 11-34.
- Brunskill, G.J. 1969: Fayetteville Green Lake, New York. II: Precipitation and sedimentation of calcite in a meromictic lake with laminated sediments. Limnol. Oceanogr. 14, 830-847.
- Burga, C.A. 1988: Swiss vegetation history during the last 18000 years. New Phytologist 110, 581-602.
- Burga, C.A. & Furrer, G. 1982: Zur Erforschung des Quartärs in der Schweiz. Geographica Helvetica 1982, 68-74.
- Burns, N.M. & Pashley, A.E. 1974: In situ measurement of the settling velocity profile of particulate organic carbon in Lake Ontario. J. Fish. Res. Board Can. 31, 291-297.
- Calmbach, L. (1994): *Hydrowin: An interactive computer program for storing and processing hydrochemical data, vers. Version 3.0* - -
- Campy, M. 1982: Le Quaternaire Franc-Comtois. Essai chronologique et paléoclimatique. Grade de docteur es sciences naturelles, Université de Franche-Comté.
- Campy, M. & Arn, R. 1991: The Jura glaciers: paleogeography in the Würmian circum-Alpine zone. Boreas 20, 17-27.
- Carbonel, P., Colin, J.-P., Danielopol, D.L., Löffler, H. & Neustrueva, I. 1988: Paleocology of limnic ostracodes: A review of some major topics. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. 62, 413-461.
- Carbonel, P., Farmer, M. & Lete, C. 1990: The morphological variability of the carapace of *Cytherissa lacustris*. Ecophenotypic aspects. Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux 47, 247-259.
- Chambers, R.L. & Eadie, B.J. 1981: Nepheloid and suspended particulate matter in south-eastern Lake Michigan. Sedimentology 28, 439-447.
- Charef, A. & Sheppard, S.M.F. 1984: Carbon and oxygen isotope analysis of calcite or dolomite associated with organic matter. Isotope Geoscience 2, 325-333.
- Charlton, M. 1983: Downflux of sediment organic matter and phosphorus in the Niagara River area of Lake Ontario. J. Great Lakes Res. 9, 201-211.
- Charlton, M.N. & Lean, D.R.S. 1987: Sedimentation, resuspension, and oxygen depletion in Lake Erie (1979). J. Great Lakes Res. 13, 709-723.
- Chivas, A.R., De Deckker, P. & Shelley, J.M.G. 1986: Magnesium and strontium in non-marine ostracod shells as indicators of palaeosalinity and palaeotemperature. Hydrobiologia 143, 135-142.
- Chondrogianni, C. 1992: Stabile Kohlenstoff-Isotope in hochproduktiven Litoralflächen des Bodensees - Indikation für die Kopplung physikalischer, biologischer und geochemischer Prozesse im Kohlenstoff-Kreislauf. In: Heidelberger Geowiss. Abh., Heidelberg, 263.
- Chondrogianni, C. & McKenzie, J.A. 1995: Enhanced CO₂ transfer across the air-water interface inferred from anomalous carbon isotope fractionation in the dissolved inorganic carbon. In: The First International Limno-geological Congress. Research and research methods in ancient and modern basin., Copenhagen, Denmark, p.20.
- Clayton, J.R., Pavlou, S.P. & Bretner, N.F. 1977: Polychlorinated biphenyls in coastal marine zooplankton: Bioaccumulation by equilibrium partitioning. Environ. Sci. Technol. 11, 676-682.
- Clot, B. 1993: Analyse aéropalynologique à Neuchâtel et à La Chaux-de-Fonds en 1992. Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 116, 89-92.
- Clot, B. 1994: Analyse aéropalynologique à Neuchâtel et à La Chaux-de-Fonds en 1993. Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 117, 111-116.
- Clot, B., Peeters, A.G., Fankhauser, A. & Frei, T. 1995: Pollens aériens en Suisse 1994. (Nr.2). Institut suisse de météorologie.
- Coplen, T.B., Kendall, C. & Hopple, J. 1983: Comparison of stable isotope reference samples. Nature 302, 236-238.
- Craig, H. 1957: Isotopic Standards for Carbon and Oxygen and Correction Factors for Mass-spectrometric analysis of Carbon Dioxide. Geochimica Cosmochimica Acta 12, 133-149.
- Crotti, P. & Pignat, C. 1986: La séquence chronologique de l'abri Freymond près du col du Mollendruz (Jura vaudois). Archéologie suisse 9, 138-148.
- Danielopol, D.L. 1971: Quelques remarques sur le peuplement ostracodologique des eaux douces souterraines d'Europe. Bull. Centre Rech. Pau - SNPA 5, 179-190.
- Danielopol, D.L. 1990: On the interest of the "Cytherissa" project and on the present state of researches. Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux 47, 15-26.
- Danielopol, D.L., Casale, L., Rogulj, B., Strobl, J. & Maier, K. 1990: Spatial distribution of *Cytherissa lacustris* living in Mondsee. Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux 47, 139-165.
- Danielopol, D.L., Martens, K. & Casale, L.M. 1989: Revision of the genus *Leucocythere*. Kaufmann 1892 (Crustacea, Ostracoda, Limnocytheridae), with the description of a new species and two new tribes. Bull. Inst. Royal Sci. Nat. de Belgique. Biologie 59, 63-94.
- Dansgaard, W. 1964: Stable isotopes in precipitation. Tellus XVI, 438-468.
- Davaud, E. 1976: Contribution à l'étude géochimique et sédimentologique de dépôts lacustres récents (Lac de Morat, Suisse). Ph.D., Université de Genève.
- Davis, M.B., Moeller, R.E. & Ford, J. 1984: Sediment focusing and pollen influx. In: Lake Sediments and Environmental History (Ed. by Haworth, E.Y. & Lund, J.W.G.). University of Minnesota Press, Minneapolis, 261-293.

- De Beaulieu, J.L., Richard, H., Ruffaldi, P. & Clerc, J. 1994: History of vegetation, climate and human action in the french Alps and the Jura over the last 15000 years. *Dissertationes Botanicae* 234, 253-275.
- De Boer, R.D. 1977: Influence of seed crystals on the precipitation of calcite and aragonite. *Amer. J. Sci.* 177, 38-61.
- De Deckker, P., Chivas, A.R., Shelley, J.M.G. & Tøgersen, T. 1988: Ostracod shell chemistry: a new palaeoenvironmental indicator applied to a regressive/transgressive record from the Gulf of Carpentaria, Australia. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 66, 231-241.
- De Deckker, P. & Forester, R.M. 1988: The use of ostracodes to reconstruct continental palaeoenvironmental records. In: *Ostracoda in the Earth Sciences* (Ed. by De Deckker, P., Colin, J.P. & Peypouquet, J.P.). Elsevier, Amsterdam, 175-200.
- Dean, W.E. & Stuiver, M. 1993: Stable carbon and oxygen isotope studies of the sediments of Elk Lake, Minnesota. In: *Elk Lake, Minnesota: Evidence for Rapid Climate Change in the North-Central United States* (Ed. by Bradbury, J.P. & Dean, W.E.). Special Paper 276, Geological Society of America, Boulder, Colorado, 163-180.
- Delorme, L.D. 1991: Ostracoda. In: *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*. Academic Press, 691-722.
- Dettman, D.L., Smith, A.J., Rea, D.K., Moore, T.C. & Lohmann, K.C. 1995: Glacial meltwater in Lake Huron during early postglacial time as inferred from single-valve analysis of oxygen isotopes in ostracodes. *Quat. Res.* 43, 297-310.
- Dominik, J., Burrus, D. & Vernet, J.-P. 1987: Transport of the environmental radionuclides in an alpine watershed. *Earth and planet. Sci. Lett.* 84, 165-180.
- Dubois, J.-P. & Schetty, O. 1977: Evolution de l'état sanitaire de la baie d'Auvernier (lac de Neuchâtel) de 1962 à 1973. *Schweiz. Z. Hydrol. Sonderabdruck* 39, 1-11.
- Durazzi, J.T. 1975: The shell chemistry of ostracodes and its paleoecological significance. Ph.D.Thesis.
- Durazzi, J.T. 1977: Stable isotopes in the ostracod shell: a preliminary study. *Geochim. cosmochim. Acta* 41, 1168-1170.
- Eadie, B.J., Chambers, R.L., Gardner, W.S. & Bell, G.L. 1984: Sediment trap studies in Lake Michigan: resuspension and chemical fluxes in the southern basin. *J. Great Lakes Res.* 10, 307-321.
- Eadie, B.J., Vanderploeg, H.A., Robbins, J.A. & Bell, G.L. 1990: Significance of sediment resuspension and particle settling. In: *Large Lakes: Ecological Structure and Function* (Ed. by Tilzer, M.M. & Serruya, C.). Springer, Berlin, Heidelberg, 196-209.
- EAWAG 1995: Eindimensionale Modellierung biogeochemischer Prozesse in Seen. No. EAWAG / SPPU Modul 2: Biogeochemische Prozesse und Kreisläufe.
- Edgington, D.N. & Robbins, J.A. 1976: Records of lead deposition in Lake Michigan sediments since 1800. *Environ. Sci. Technol.* 10, 266-274.
- Egloff, M. 1989: Des premiers chasseurs au début du christianisme. In: *Histoire du pays de Neuchâtel* (Ed. by I. Attinger, Hauteville, 11-160).
- Elcher, U. & Siegenthaler, U. 1976: Palynological and oxygen isotope investigations on Late-Glacial sediment cores from Swiss Lakes. *Boreas* 5, 109-117.
- Eicher, U., Siegenthaler, U. & Wegmüller, S. 1981: Pollen and oxygen isotope analyses on late and post-glacial sediments of the Tourbière de Chirens (Dauphiné, France). *Quat. Res.* 15, 160-170.
- Emerson, S. 1976: Early diagenesis in anoxic sediments: Chemical equilibria in interstitial waters. *Geochim. cosmochim. Acta* 40, 925-934.
- Emrich, K., Ehhalt, D.H. & Vogel, J.C. 1970: Carbon isotope fractionation during the precipitation of calcium carbonate. *Earth and planet. Sci. Lett.* 8, 363-371.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H.A. & Urey, H.C. 1953: Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Bulletin Geol. Soc. Am.* 64, 1315-1326.
- Evans, R.D. 1993: Various phenomena observed in lakes which suggest sediment resuspension as an important mechanism. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 25, 318-319.
- Evans, R.D. & Håkanson, L. 1992: Measurement and prediction of sedimentation in small Swedish lakes. *Hydrobiologia* 235/236, 143-152.
- Fanning, K.A., Carder, K.L. & Betzer, P.F. 1982: Sediment resuspension by coastal waters: A potential mechanism for nutrient recycling on the ocean's margins. *Deep Sea Res.* 29, 953-965.
- Ferrero, J. 1965: Dosage des principaux minéraux des roches par diffraction de Rayon X. Rapport non publié, C.F.P.
- Filippi, M.L. 1996: Palaeoclimatic reconstruction since the Late-Glacial in Western Switzerland: Stable isotopes of lacustrine carbonates. Ph.D.Thesis, Université de Lausanne.
- Filippi, M.L., Lambert, P., Hunziker, J.C. & Kübler, B. 1998: Monitoring detrital input and resuspension effects on sediment trap material using mineralogy and stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$): the case of Lake Neuchâtel (Switzerland). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 140, 33-50.
- Filippi, M.L., Lambert, P., Hunziker, J., Kübler, B. & Bernasconi, S. 1999: Climatic and anthropogenic influence on the stable isotope record from bulk carbonates and ostracodes in Lake Neuchâtel, Switzerland, during the last two millennia. *Journal of Paleolimnology*, 21/1, 19-34.
- Flower, R.J. 1991: Field calibration and performance of sediment traps in a eutrophic holomictic lake. *J. Paleolimn.* 5, 175-188.
- Folk, R.L. 1974: The natural history of crystalline calcium carbonate: effect of magnesium content and salinity. *J. Sed. Petr.* 44, 40-53.

- Forstner, U. & Patchineelam, S.R. 1980: Chemical associations of heavy metals in polluted sediments from the lower Rhine River. In: *Particules in Water* (Ed. by Kavanough, M.C. & Leckie, J.O.). Amer. Chem. Society, 178-193.
- Friedman, I. & O'Neil, J.R. 1977: Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. In: *Data of Geochemistry* (Ed. by Fleisher, M.). U.S. Geol. Survey Prof. Paper 440-KK.
- Fritz, P. 1984: Radiocarbon Dating of Marl deposits. -Can we Assess the Hard Water Effect? In: *Correction of Quaternary Chronologies* (Ed. by Mahaney, W.C.). Toronto, 15-21.
- Fritz, P., Anderson, T.W. & Lewis, C.F.M. 1975: Late-Quaternary Climatic Trends and History of Lake Erie from Stable Isotope Studies. *Science* 190, 267-269.
- Fritz, P., Morgan, A.V., Eicher, U. & McAndrews, J.H. 1987: Stable isotope, fossil coleoptera and pollen stratigraphy in late quaternary sediments from Ontario and New York state. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 58, 183-202.
- Fritz, P. & Poplawski, S. 1974: ^{18}O and ^{13}C in the shells of freshwater molluscs and their environments. *Earth and planet. Sci. Lett.* 24, 91-98.
- Fronval, T., Jensen, N.B. & Buchardt, B. 1995: Oxygen isotope disequilibrium precipitation of calcite in Lake Arresø, Denmark. *Geology* 23, 463-466.
- Fuhrmann, O. 1900: Le plancton du lac de Neuchâtel. *Bull. Soc. neuchât. Sci. nat.* 28, 86-99.
- Furrer, G., Burga, C., Gamper, M., Holzhauser, H. & Maisch, M. 1987: Zur Gletscher-, Vegetations und Klimageschichte der Schweiz seit der Späteiszeit. *Geographica Helvetica* 1987, 61-91.
- Furrer, G. & Holzhauser, H. 1984: Gletscher- und klimageschichtliche Auswertung fossiler Hölzer. *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd.* 50, 117-136.
- Gaillard, M.-J. & Moulin, B. 1989: New results on the Late-Glacial history and environment of the Lake of Neuchâtel (Switzerland). Sedimentological and palynological investigations at the Paleolithic site of Hauterive-Champréveyres. *Eclogae geol. Helv.* 82, 203-218.
- Gamper, M. & Suter, J. 1982: Postglaziale Klimageschichte der Schweizer Alpen. *Geographica Helvetica* 1982, 105-114.
- Gardner, W.D. 1977: Fluxes, dynamics and chemistry of particulates in the ocean. Ph.D. Thesis.
- Gardner, W.D. 1980a: Field assessment of sediment traps. *J. Mar. Res.* 38, 41-52.
- Gardner, W.D. 1980b: Sediment trap dynamics and calibration. A laboratory evaluation. *J. Mar. Res.* 38, 17-39.
- Gardner, W.D., Hinga, K.R. & Marra, J. 1983: Observations on the degradation of biogenic material in the deep ocean with implications on accuracy of sediment trap fluxes. *J. Mar. Res.* 41, 195-214.
- Garlick, G.D. 1974: The stable isotopes of oxygen, carbon and hydrogen in the marine environment. In: *The sea* (Ed. by Goldberg, E.D.). Marine Chemistry 5, John Wiley & Sons, Inc., 393-425.
- Gasth, A. 1975: Tripton sedimentation in eutrophic lakes - simple correction for the resuspended matter. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 19, 116-122.
- Gasse, F., Fontes, J.C., Plaziat, J.C., Carbonel, P., Kaczmarek, I., De Deckker, P., Soulié-Marsche, I., Callot, Y. & Dupeuble, P.A. 1987: Biological remains, geochemistry and stable isotopes for the reconstruction of environmental and hydrological changes in the Holocene lakes from the North Sahara. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 60, 1-46.
- Gat, J.R. & Lister, G.S. 1995: The "catchment effect" on the isotopic composition of lake waters; its importance in palaeolimnological interpretations. In: *Problems of stable isotopes in tree-rings, lake sediments and peat-bogs as climatic evidence for the Holocene* (Ed. by Frenzel, B., Stauffer, B. & Weiss, M.M.). *Palaeoclimate Research No.15*, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, New York, 1-15.
- Gaudette, H.E., Flight, W.R., Toner, L. & Folger, D.W. 1974: An inexpensive titration method for determination of organic carbon in recent sediments. *J. Sed. Petr.* 44, 249-253.
- Geiger, W. 1990: The role of oxygen in the disturbance and recovery of the *Cytherissa lacustris* population of Mondsee (Austria). *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux* 47, 167-189.
- Gloor, M., Wüest, A. & Münnich, M. 1993: Benthic boundary mixing and resuspension induced by internal seiches. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 25, 82.
- Golterman, H.L. 1984: Sediments, modifying and equilibrating factors in the chemistry of freshwater. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 22, 23-59.
- Gonfiantini, R. 1986: Environmental isotopes in lake studies. In: *Handbook of environmental isotope geochemistry. Vol. 2. The terrestrial environment* (Ed. by Fritz, P.A.F., J. Ch.). 2, Elsevier, Amsterdam, 113-168.
- Grove, J.M. 1988: *The Little Ice Age*. Methuen & Co., London & New York, 498 p.
- Grove, J.M. & Switsur, R. 1994: Glacial Geological Evidence for the Medieval Warm Period. In: *The Medieval Warm Period* (Ed. by Hughes, M.K. & Diaz, H.F.). Kluwer, Dordrecht, 143-170.
- Hadorn, H. 1987: Pollenanalytische Untersuchungen über die jüngere Vegetations- und Siedlungsgeschichte am Murtensee. *Archéologie fribourgeoise Chronique archéologique* 1984, 107-127.
- Hadorn, P. 1986: La Palynologie. *Archéol. neuchâteloise* 4, 37-45.
- Hadorn, P. 1992: Vegetationsgeschichtliche Studie am Nordufer des Lac de Neuchâtel. Ph.D. Thesis, University of Bern.
- Hadorn, P. 1994: Saint-Blaise/Bains des Dames I. Palynologie d'un site néolithique et histoire de la végétation des derniers 16000 ans. *Archéol. neuchâteloise* 18.
- Håkansson, S. 1985: A review of various factors influencing the stable carbon isotope ratio of organic lake sediments by the change from glacial to post-glacial environmental conditions. *Quaternary Sci. Rev.* 4, 135-146.

- Hargrave, B.T. & Burns, N.M. 1979: Assessment of sediment trap collection efficiency. *Limnol. Oceanogr.* 24, 1124-1135.
- Hartmann, G. & Puri, H.S. 1974: Summary of neontological and palaeontological classification of ostracoda. *Mitt. Hamburg. Zool. Mus. Inst.* 70, 7-73.
- Hays, P.D. & Grossman, E.L. 1991: Oxygen isotopes in meteoric calcite cements as indicators of continental paleoclimate. *Geology* 19, 441-444.
- Heaton, T.H.E., Holmes, J.A. & Bridgewater, N.D. 1995: Carbon and oxygen isotope variations among lacustrine ostracods: implications for paleoclimatic studies. *The Holocene* 5, 428-434.
- Herczeg, A.L. & Fairbanks, R.G. 1987: Anomalous carbon isotope fractionation between atmospheric CO₂ and dissolved inorganic carbon induced by intense photosynthesis. *Geochimica Cosmochimica Acta* 51, 895-899.
- Higgitt, S.R., Oldfield, F. & Appleby, P.G. 1991: The record of land use change and soil erosion in the late Holocene sediments of the Petit Lac d'Annecy, eastern France. *The Holocene* 1, 14-28.
- Hiller, D. 1972: Untersuchungen zur Biologie und zur Ökologie limnischer Ostracoden aus der Umgebung von Hamburg. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 40, 400-497.
- Hilton, J. 1985: A conceptual framework for predicting the occurrence of sediment focusing and sediment redistribution in small lakes. *Limnol. Oceanogr.* 30, 1131-1143.
- Hilton, J. & Lishman, J.P. 1985: The effect of redox changes on the magnetic susceptibility of sediments from a seasonally anoxic lake. *Limnol. Oceanogr.* 30, 907-909.
- Hilton, J., Lishman, J.P. & Chapman, J.S. 1986: Magnetic and chemical characterisation of a diagenetic magnetic mineral formed in the sediments of productive lakes. *Chem. Geol.* 56, 325-333.
- Hofmann, A. & Dominik, J. 1995: Turbidity and mass concentration of suspended matter in lake water: A comparison of two calibration methods. *Aquatic Sciences* 57, 54-69.
- Hollander, D.J. 1989: Carbon and Nitrogen Isotopic Cycling and Organic Geochemistry of Eutrophic Lake Greifen: implications for preservation and accumulation of ancient organic carbon-rich sediments. *Mitt. geol. Inst. ETH u. Univ. Zürich, Neue Folge Nr.279*, 317pp.
- Holmes, J.A. 1992: Nonmarine ostracods as Quaternary palaeoenvironmental indicators. *Progress in Physical Geography* 16, 405-431.
- Holzhauser, H. 1984: Zur Geschichte des Aletschgletschers und des Fieschergletschers. *Phys. Geographie* 13, 1-10.
- Holzhauser, H. 1992: Mouvements des glaciers dans les Alpes suisses depuis 2700BP. *Les nouvelles de l'archéologie* 50, 37.
- Holzhauser, P. 1988: Methoden zur Rekonstruktion von Gletscherschwankungen. *Die Alpen* 64, 135-163.
- House, W.A. 1987: Inhibition of calcite crystal growth by inorganic phosphate. *J. Colloid Interf. Sci.* 119, 505-511.
- Huber, A. 1993: Ufererosion am Neuenburgersee. In: *Seeuferzerstörung und Seeuferrenaturierung in Mitteleuropa* (Ed. by Ostendorf/Krumscheid-Plankert). *Limnologie aktuell* 5, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, New York.
- Hughes, M.K. & Diaz, H.F. 1994: Was there a "Medieval Warm Period", and if so, where and when? In: *The Medieval Warm Period* (Ed. by Hughes, M.K. & Diaz, H.F.). Kluwer, Dordrecht, 109-142.
- Huntley, B. & Prentice, I.C. 1993: Holocene Vegetation and Climates of Europe. In: *Global Climates since the Last Glacial Maximum* (Ed. by Wright, H.E., Kutzbach, J.E., Webb, T., Ruddiman, W.F., Street-Perrott, F.A. & Bartlein, P.J.). University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Imberger, J. 1985: The diurnal mixed layer. *Limnol. Oceanogr.* 30, 737-770.
- Imboden, D.M., Lemmin, U., Joller, T., Fischer, K.H. & Weis, W. 1981: Lake mixing and trophic state. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 21, 115-119.
- Imboden, D.M., Lemmin, U., Joller, T. & Schurter, M. 1983: Mixing processes in lakes: mechanisms and ecological relevance. *Schweiz. Z. Hydrol.* 45, 11-44.
- Ingram, M.J., Underhill, D.J. & Wigley, T.M.L. 1978: Historical Climatology. *Nature* 276, 329-334.
- Jäckli, H. 1972: Die Schweiz zur letzten Eiszeit. In: *Atlas der Schweiz* (Ed. by Eidgenössische Landestopographie). Wabern/Bern.
- Jackson, M.L. 1969: *Soil Chemical Analysis-Advanced Course*. Published by the Author, Madison, 895 p.
- Jacobson, G.L. & Bradshaw, R.H.W. 1981: The selection of sites for paleovegetational studies. *Quat. Res.* 16, 80-96.
- Jantschik, R., Nyffeler, F. & Donald, O.F.X. 1992: Marine particle size measurement with a stream scanning laser system. *Marine Geol.* 106, 239-250.
- Jussby, A. & Powell, T. 1975: Vertical patterns of eddy diffusion during stratification in Castle Lake. *Limnol. Oceanogr.* 20, 530-543.
- Jons, M. 1987: Holozäne Seespiegelschwankungen. *Geographica Helvetica* 1987, 123-125.
- Jornod, G. 1993: Observations météorologiques faites en 1992 à l'Observatoire cantonal de Neuchâtel. *Bull. Soc. neuchâtl. Sci. nat.* 116, 97-104.
- Karickhoff, S.W., Brown, D.S. & Scott, T.A. 1979: Sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments. *Water Res.* 13, 241-248.
- Keeling, C.D., Mook, W.G. & Tans, P.P. 1979: Recent trends in the ¹³C/¹²C ratio of atmospheric carbon dioxide. *Nature* 277, 121-123.
- Kelts, K. 1978: Geological and sedimentary evolution of lakes Zurich and Zug, Switzerland. Ph.D. Thesis, ETH-Zurich.
- Kelts, K., Briegel, U., Ghilardi, K. & Hsü, K. 1986: The limnogeology-ETH coring system. *Schweiz. Z. Hydrol.* 48, 105-115.

- Kelts, K. & Hsü, K.J. 1978: Freshwater Carbonate Sedimentation. In: Lakes. Chemistry, Geology, Physics (Ed. by Lerman, A.). Springer-Verlag, New York. 295-323.
- Kelts, K. & Talbot, M. 1990: Lacustrine Carbonates as Geochemical Archives of Environmental Change and Biotic/Abiotic Interactions. In: Large Lakes. Ecological Structure and Function (Ed. by Tilzer, M.M. & Serruya, C.). Springer, Berlin, Heidelberg, 288-315.
- Kemp, A.L.W. & Mudrochova, A. 1972: Distribution and forms of nitrogen in a Lake Ontario sediment core. *Limnol. Oceanogr.* 17, 855-867.
- Kemp, A.L.W., Thomas, R.L., Wong, H.K.T. & Johnston, L.M. 1977: Nitrogen and C/N ratios in the sediments of Lakes Superior, Huron, St. Clair, Erie and Ontario. *Canad. J. Earth Sci.* 14, 2402-2413.
- Klug, H.P. & Alexander, L. 1974: X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials. Wiley, New York.
- Knauer, G.A., Karl, D.M., Martin, J.H. & Hunter, C.N. 1984: In situ effects of selected preservatives on total carbon, nitrogen and metals collected in sediment traps. *J. Mar. Res.* 42, 445-462.
- Knauss, J.-A. 1978: Introduction to physical oceanography. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 338 p.
- Kübler, B. 1983: Dosage quantitatif des minéraux majeurs des roches sédimentaires par diffraction X. (Cahiers de l'Institut de Géologie de Neuchâtel No. Série AX, 1.1 & 1.2). Institut de Géologie.
- Kübler, B., Bétrix, M.-A. & Fauguel, P. 1979: Répartition de quelques éléments dans les sédiments de surface du Lac de Neuchâtel. modèle sédimentologique et géochimique. *Bull. Soc. neuchât. Sci. nat.* 102, 129-148.
- Kübler, B., Jantschik, R. & Huon, S. 1990: Minéralogie et granulométrie des poussières éoliennes, dites sahariennes, du 24 avril 1989 à Neuchâtel. Leur importance pour l'environnement, les sols et les sédiments. *Bull. Soc. neuchât. Sci. nat.* 113, 75-98.
- Küchler-Krischun, J. & Kleiner, J. 1990: Heterogeneously nucleated calcite precipitation in Lake Constance. A short time resolution study. *Aquatic sciences* 52, 176-197.
- Kunz, B. 1983: Heterogene Nukleierung und Kristallwachstum von CaCO_3 (Calcit) in natürlichen Gewässern. Zürich.
- Laboratoire de Recherches Hydrauliques, H.e.G.d.I.E.P.f.d.Z. 1990: Erosion de la rive sud du Lac de Neuchâtel. Examen des causes. Prévision de l'évolution future. Recommandations sur les mesures à prendre. Groupe d'étude et de gestion de la Grande Caricaie, à Champ-Pittet près d'Yverdon. Zürich, 61 p.
- Lal, D. & Lerman, A. 1973: Dissolution and behavior of particulate biogenic matter in the ocean: Some theoretical considerations. *J. Geophys. Res.* 78, 7100-7111.
- Lamb, H.H. 1977: Climate: Present, Past and Future. Methuen, London.
- Lamb, H.H. 1982: Climate. History and the Modern World. Methuen, London.
- Lambert, G., Lavier, C. & Dupouey, J.-L. 1992: Dendrochronologie et paléoclimatologie: une nouvelle piste. *Les nouvelles de l'archéologie* 50, 55-57.
- Lambert, P., Puertas, O., Druart, J.-C., Rolli, M. & Kübler, B. in prep.: A record of human impact on vegetation, soil erosion and eutrophication in the Late Holocene sediments of Lake Neuchâtel, Switzerland.
- Lastein, E. 1976: Recent sedimentation and resuspension of organic matter in eutrophic Lake Esrom, Denmark. *Oikos* 27, 44-49.
- Lee, C., McKenzie, J.A. & Sturm, M. 1987: Carbon isotope fractionation and changes in the flux and composition of particulate matter resulting from biological activity during a sediment trap experiment in Lake Greifen, Switzerland. *Limnol. Oceanogr.* 32, 83-96.
- Lerman, A., Lal, D. & Dacey, M.F. 1974: Stokes settling and chemical reactivity of suspended particles in natural waters. In: Suspended Solids in Water (Ed. by Gibbs, R.J.). Plenum Press, New York, 17-47.
- Li, Y.H. 1973: Vertical eddy diffusion coefficient in Lake Zürich. *Schweiz. Z. Hydrol.* 35, 1-7.
- Lister, G.S. 1988a: A 15,000-Year Isotopic Record from Lake Zürich of deglaciation and climatic change in Switzerland. *Quat. Res.* 29, 129-141.
- Lister, G.S. 1988b: Stable isotopes from lacustrine ostracoda as tracers for continental palaeoenvironments. In: Ostracoda in the Earth Sciences (Ed. by DeDecker, P., Colin, J.P. & Peyrouquet, J.P.). 20, Elsevier, Amsterdam, 201-218.
- Lister, G.S. 1989: Reconstruction of palaeo air temperature changes from oxygen isotopic records in Lake Zürich: the significance of seasonality. *Ecolog. geol. Helv.* 82, 219-234.
- Lister, G.S., Kelts, K., Zao, C.K., Yu, J.-Q. & Niessen, F. 1991: Lake Qinghai, China: closed-basin lake levels and the oxygen isotope record for ostracoda since the latest Pleistocene. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 84, 141-162.
- Livingstone, D.M. 1993: Temporal structure in the deep-water temperature of four Swiss lakes: A short term climatic change indicator? *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 25, 75-81.
- Löffler, H. 1969: Recent and subfossil distribution of *Cytherissa lacustris* (Ostracoda) in Lake Constance. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* 17, 240-251.
- Löffler, H. 1986: An early meromictic stage in Lobsigensee (Switzerland) as evidenced by ostracods and Chaoborus. *Hydrobiologia* 143, 309-314.
- Löffler, H. 1990: *Cytherissa lacustris* - an introduction. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux* 47, 11-12.
- Lotter, A. 1990: Die Entwicklung terrestrischer und aquatischer Ökosysteme am Rotsee (Zentralschweiz) im Verlauf der letzten 15000 Jahre. *Mitt. Natf. Ges. Luzern* 31, 81-97.
- Lotter, A.F., Eicher, U., Sieghentaler, U. & Birks, H.J.B. 1992: Late-glacial climatic oscillations as recorded in Swiss lake sediments. *J. Quat. Sci.* 7, 187-204.

- Luckman, B.H. 1994: Evidence for Climatic Conditions between ca. 900-1300 A.D. in the Southern Canadian Rockies. In: The Medieval Warm Period (Ed. by Hughes, M.K. & Diaz, H.F.). Kluwer, Dordrecht, 171-182.
- Lüdi, W. 1935: Das grosse Moos im westschweizerischen Seelande und die Geschichte seiner Entstehung. In: Veröff. Bot. Inst. Rübel Zürich, Bern, 344p.
- Maddocks, R.F. 1982: Ostracoda. In: The Biology of Crustacea (Ed. by Abele, L.G.). Vol.1: Systematics, the Fossil Record, and Biogeography, Academic Press, New York, 221-239.
- Magny, M. 1992a: Holocene lake-level fluctuations in Jura and the northern subalpine ranges, France: regional pattern and climatic implications. *Boreas* 21, 319-334.
- Magny, M. 1992b: Les fluctuations des lacs jurassiens et subalpins. *Les nouvelles de l'archéologie* 50, 32-36.
- Magny, M. 1993: Solar influences on holocene climatic changes illustrated by correlations between past lake-level fluctuations and the atmospheric ^{14}C record. *Quat. Res.* 39, 1-9.
- Marguier, S. 1992: L'enregistrement des paysages végétaux dans les lacs du Jura par les pollens et les macrorestes végétaux: étude de deux cas. DEA, Université de Franche-Comté.
- Mason, B. & Moore, C.B. 1982: Principles of Geochemistry. Wiley, New York, 344p.
- Matthey, F. 1971: Contribution à l'étude tardi- et postglaciaire de la végétation dans le Jura central. *Beitr. Geobot. Landesaufn. Schweiz* 53, 86 p.
- McConnaughey, T. 1989: ^{13}C and ^{18}O isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns. *Geochimica Cosmochimica Acta* 53, 151-162.
- McCrea, J.M. 1950: On the Isotopic Chemistry of Carbonates and a Paleotemperature Scale. *Journal of chemical physics* 18, 849-857.
- McKenzie, J.A. 1982: Carbon-13 Cycle in Lake Greifen: A Model for Restricted Ocean Basins. In: *Nature and Origin of Cretaceous Carbon-rich Facies* (Ed. by Schlanger, S.O. & Cita, M.B.). Academic Press, London, 197-207.
- McKenzie, J.A. 1985: Carbon isotopes and productivity in the lacustrine and marine environment. In: *Chemical processes in lakes* (Ed. by Stumm, W.). Wiley, New York, 99-118.
- McKenzie, J.A. & Hollander, D.J. 1993: Oxygen-Isotope Record in Recent Carbonate Sediments from Lake Greifen, Switzerland (1750-1986): Application of Continental Isotopic Indicator for Evaluation of Changes in Climate and Atmospheric Circulation Patterns. In: *Climate Change in Continental Isotopic Records* (Ed. by Swart, P.K., Lohmann, K.C., McKenzie, J. & Savin, S.). Geophysical Monograph 78, American Geophysical Union, 101-111.
- McNaught, D.C. 1982: Short cycling of contaminants by zooplankton and their impact on Great Lakes Ecosystem. *J. Great Lakes Res.* 8, 360-366.
- Miserez, J.-J. 1970: Premier bilan des indices de saturation en carbonates dans le bassin supérieur de l'Aareuse (NE). No. Institut de Géologie de Neuchâtel.
- Monbaron, M. 1973: Etude roentgéographique d'une moraine de fond (Valangin, NE). *Bull. Soc. neuchât. Sci. nat.* 96, 109-134.
- Monnier, F. 1982: Thermal diagenesis in the Swiss Molasse Basin: implications for oil generation. *Canadian Journal of Earth Sciences* 19, 328-342.
- Moore, D.M. & Reynolds, R.C.J. 1989: X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford University Press, Oxford, 326p.
- Moore, R.C. 1961: Treatise on invertebrate paleontology. Part Q: Arthropoda 3, Crustacea, Ostracoda. University of Kansas Press, Lawrence, 442p.
- Mouchet, P. 1995: Le Kimméridgien du Jura central. Microfaciès, minéralogie et interprétation séquentielle. Ph.D. Thesis, Neuchâtel.
- Moulin, B. 1991: Hauterive-Champréveyres. 3. La dynamique sédimentaire et lacustre durant le Tardiglaciaire et le Postglaciaire. *Archéol. neuchâteloise* 9.
- Mudroch, A. & Mudroch, P. 1992: Geochemical composition of the nepheloid layer in Lake Ontario. *J. Great Lakes Res.* 18, 154-168.
- Müller, I. & Zöll, G. 1980: Karsthydrologische Untersuchungen mit natürlichen und künstlichen Tracern im Neuenburger Jura (Schweiz). *Steir. Beitr. z. Hydrogeologie* 32.
- Niessen, F. 1987: Sedimentologische, geophysikalische und geochemische Untersuchungen zur Entstehung und Ablagerungsgeschichte des Luganersees (Schweiz). Ph.D. Thesis, ETH Zürich. In: *Mitt. Geolog. Inst. ETH u. Univ. Zürich*, 329.
- Niessen, F. & Sturm, M. 1987: Die Sedimente des Baldeggersees (Schweiz): Ablagerungsraum und Eutrophierungsentwicklung während der letzten 100 Jahre. *Arch. Hydrobiol.* 108, 365-383.
- Niessen, F., Wick, L., Bonani, G., Chondrogianni, C. & Siegenthaler, C. 1992: Aquatic system response to climatic and human changes: productivity, bottom water oxygen status, and sapropel formation in Lake Lugano over the last 10000 years. *Aquatic Sciences* 54, 257-276.
- Nüchterlein, H. 1969: Süßwasserostacoden aus Franken. Ein Beitrag zur Systematik und Ökologie der Ostracoden. *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.* 54, 223-287.
- Nyffeler, U.P., Schindler, P.W., Wirz, U.E. & Imboden, D.M. 1983: Chemical and geochemical studies of Lake Biel. II. A chemical approach to lake mixing. *Schweiz. Z. Hydrol.* 45, 45-61.
- O'Neil, J., Adami, L.H. & Epstein, S. 1975: Revised value for the O18 fractionation between CO₂ and H₂O at 25°C. *Jour. Research U.S. Geol. Survey* 3, 623-624.
- O'Neil, J., Clayton, R. & Mayeda, T.K. 1969: Oxygen Isotope Fractionation in Divalent Metal Carbonates. *Jour. Chem. Phys.* 51, 5547-5558.

- Oana, S. & Deevey, E.E. 1960: Carbon-13 in lake waters and its possible bearing on palcolimnology. *Amer. J. Sci.* 258-A, Bradley vol., 253-272.
- OFEFP 1994: L'Etat des Lacs en Suisse. (Cahier de l'environnement No. No 237). Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).
- OFPE 1987: Lac de Neuchâtel: Etude des affluents. No. Service de documentation, Office fédéral de la protection de l'environnement, 3003 Berne.
- Ogilvie, A.E.J. 1991: Climatic Changes in Iceland, A.D. 865 to 1598. *Acta Archaeol.* 61, 233-251.
- Oldfield, F. & Appleby, P.G. 1984: Empirical testing of ^{210}Pb -dating models for lake sediments. In: *Lake Sediments and Environmental History* (Ed. by Haworth, E.Y. & Lund, J.W.G.). University of Minnesota Press, Minneapolis, 93-124.
- Ostendorp, W. 1990: Sedimentchemische Untersuchungen zur Umweltgeschichte des westlichen Untertagegebietes. *Ber. röm.-german. Kom.* 71, 271-279.
- Palacios-Fest, M.R., Cohen, A.S. & Anadón, P. 1994: Use of ostracodes as paleoenvironmental tools in the interpretation of ancient lacustrine records. *Revista Española de Paleontología* 9, 145-164.
- Parker, J.I., Conway, H.L., Yaguchi, E.M. & Edgington, D.N. 1978: Dissolution of diatom frustules and silicon cycling in Lake Michigan, U.S.A. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 20, 326-340.
- Parker, J.I. & Edgington, D.N. 1976: Concentration of diatom frustules in Lake Michigan sediment cores. *Limnol. Oceanogr.* 21, 887-893.
- Patzelt, G. 1973: Die postglazialen Gletscher- und Klimaschwankungen in der Venedigergruppe (Hohe Tauern, Ostalpen). *Z. Geomorph. NF, Suppl.-Bd.* 16, 25-72.
- Patzelt, G. 1977: Der zeitliche Ablauf und das Ausmass postglazialer Klimaschwankungen in den Alpen. In: *Dendrochronologie und postglaziale Klimaschwankungen in Europa* (Ed. by Frenzel, B.). 13, *Erdwissenschaftliche Forschung*, 248-259.
- Patzelt, G. 1980: Neue Ergebnisse der Spät- und Postglazialforschung in Tirol. *Osterr. Geogr. Jahr.* 76/77, 11-18.
- Persoz, F. 1982: Inventaire minéralogique, diagenèse des argiles et minéralostratigraphie des séries jurassiques et crétacées inférieures du Plateau suisse et de la bordure sud-est du Jura entre les lacs d'Annecy et de Constance. *Mat. cart. géol. Suisse N.S.* 155.
- Persoz, F. & Remane, J. 1976: Minéralogie et géochimie des formations à la limite Jurassique-Crétacé dans le Jura et le Bassin Vocontien. *Eclogae geol. Helv.* 69, 1-138.
- Peters, T. 1969: Tonmineralogie einiger Glazialablagerungen im Schweizerischen Mittelland. *Eclogae geol. Helv.* 62, 517-525.
- Pétrequin, A.-M. & Pétrequin, P. 1988: Le Néolithique des Lacs, Préhistoire des Lacs de Chalain et de Clairvaux (4000-2000 av. J.-C.). Editions Errance, Paris.
- Pétrequin, P. 1989: Les sites littoraux néolithiques de Clairvaux-les-Lacs, II, Le Néolithique moyen. Edition de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.
- Pfister, C. 1985: Veränderungen der Sommerwitterung im südlichen Mitteleuropa von 1270-1400 als Auftakt zum Gletscherhochstand der Neuzeit. *Geographica Helvetica* 1985, 186-195.
- Pfister, C. 1987: Variations in the spring-summer climate of Central Europe from the High Middle Ages to 1850. In: *Long and Short Term Variability of Climate* (Ed. by Wanner, H. & Siegenthaler, U.). *Lecture Notes in Earth Sciences* Springer-Verlag, Berlin, 57-82.
- Pfister, C. 1988: Klimageschichte der Schweiz: 1525-1860: das Klima der Schweiz von 1525-1860 und seine Bedeutung in der Geschichte von Bevölkerung und Landwirtschaft. In: *Academia Helvetica*, 163.
- Pfister, C. 1992: Five centuries of Little Ice Age climate in Western Europe. In: *Proceedings of the International Symposium on the Little Ice Age Climate*, 208-212.
- Pfister, C., Yan, Z. & Schüle, H. 1994: Climatic variations in western Europe and China, AD 1645-1715: a preliminary continental-scale comparison of documentary evidence. *The Holocene* 4, 206-211.
- Pittet, A. 1990: Caractérisation et signification géochimique des alcools libres, estérifiés et non estérifiés dans le sédiment du Lac de Neuchâtel. Comparaison avec des traceurs organiques d'origine synthétique et des traceurs inorganiques. Ph.D., Université de Neuchâtel.
- Pittet, A., Stettler, R. & Kübler, B. 1990: Use of coprostanol as a specific allochthonous fecal indicator in surface sediment of the Lake of Neuchâtel. *Aquatic Sciences* 52, 130-143.
- Pochon, M. 1973: Apport allochtone dans les sols jurassiens (Jura vaudois et Jura neuchâtelois). *Bull. Soc. neuchât. Sci. nat.* 96, 135-147.
- Pochon, M. 1974: Apport allochtone dans les sols jurassiens. In: *Actes du 5ème Congrès Suisse de Spéléologie*, Interlaken, 102-114.
- Pochon, M. 1975: Evolution de la phase alumino-silicatée des sols sous climat tempéré humide du Haut-Jura Suisse (domaine calcaire). *Bull. Groupe franç. Argiles XXVII*, 69-85.
- Pochon, M. 1978: Origine et évolution des sols du Haut Jura Suisse. *Mém. Soc. Helv. Sci. Nat.* XC.
- Pokorni, B. 1983: Evolution de l'état sanitaire du lac de Neuchâtel (Baie d'Auvernier) de 1975 à 1980. No. Rapport du Service Cantonal de la Protection de l'Environnement.
- Portmann, J.-P. 1974: Pléistocène de la région de Neuchâtel (Suisse). *Bull. Soc. neuchât. Géogr.* 54, 69-90.
- Pugin, A. 1991: Séquences sédimentaires glaciaires dans le Seeland et le Mittelland bernois et soleurois. *Eclogae geol. Helv.* 84, 177-205.
- Ramseier, M. 1985: Microfaciès et minéralogie du passage Dogger-Malm dans la région du Val-de-Travers (NE). *Bull. Soc. neuchât. Sci. nat.* 108, 163-181.
- Renner, F. 1982: Beiträge zur Gletschergeschichte des Gotthardgebietes und dendroklimatologische Untersuchungen an fossilen Hölzern. *Phys. Geographie* 8.

Références bibliographiques

- Rey, J.P. & Kübler, B. 1983: Identification des micas des séries sédimentaires par diffraction X à partir de la série harmonique (001) des préparations orientées. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 63, 13-36.
- Richard, H. 1992: Les fluctuations de la limite altitudinale de la forêt. *Les nouvelles de l'archéologie* 50, 38-41.
- Richard, H. 1994: Indices polliniques d'une néolithisation précoce sur le premier plateau du Jura (France). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences Paris* 318, 993-999.
- Richard, J.-L. 1965: Extraits de la carte phytosociologique des forêts du canton de Neuchâtel. *Matériaux pour le levé géobotanique de la Suisse* 47.
- Richoz, I., Gaillard, M.-J. & Magny, M. 1994: The influence of human activities and climate on the development of vegetation at Seedorf, southern swiss plateau during the Holocene: a case study. *Dissertationes Botanicae* 234, 423-445.
- Richoz, I. & Gaillard, M.J. 1989: Histoire de la végétation neuchâteloise de l'époque néolithique à nos jours. Analyse pollinique d'une colonne sédimentaire prélevée dans le lac de Neuchâtel (Suisse). *Bull. Soc. vaud. Sci. nat.* 79, 355-377.
- Ritchie, J.C. & McHenry, J.R. 1990: Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review. *J. Environm. Qual.* 19, 215-233.
- Rolli, M. 1990: Dosage semi-quantitatif sur SCINTAG. Programme Basic sur Macintosh SE. No. Série A.X. No.20, 41pp.). *Cahiers de l'Institut de Géologie de l'Université de Neuchâtel (IGUN)*.
- Rolli, M. 1992: Dosage semi-quantitatif RX sur SCINTAG. Programme Basic sur Macintosh SE. (Cahiers de l'Institut de Géologie No. Série A.X., 20). *Institut de Géologie*.
- Rosa, F. 1985: Sedimentation and sediment resuspension in Lake Ontario. *J. Great Lakes Res.* 11, 13-25.
- Rosa, F., Nriagu, J.O., Wong, H.K.T. & Burns, N.M. 1983: Particulate flux at the bottom of Lake Ontario. *Chemosphere* 12, 1345-1354.
- Rösch, M. 1983: Geschichte der Nussbaumer Seen (Kanton Thurgau) und ihrer Umgebung seit dem Ausgang der letzten Eiszeit aufgrund quartärbotanischer, stratigraphischer und sedimentologischer Untersuchungen. *Mitt. Thurg. Naturf. Ges.* 45, 1-110.
- Rüthlisberger, F., Haus, P., Holzhauser, H., Keller, W., Bircher, W. & Renner, F. 1980: Holocene climatic fluctuations - radiocarbon dating of fossil soils (fAh) and wood from moraines and glaciers in the Alps. *Geographica Helvetica* 35, 21-52.
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L. & Gonfiantini, R. 1992: Relation between long-term Trends of Oxygen-18 Isotope Composition of Precipitation and Climate. *Science* 258, 981-985.
- Rozanski, K., Araguás-Araguás, L. & Gonfiantini, R. 1993: Isotopic patterns in modern global precipitation. In: *Climate Change in Continental Isotopic Records* (Ed. by Swart, P.K., Lohmann, K.C., McKenzie, J. & Savin, S.). *Geophysical Monograph* 78, American Geophysical Union, 1-36.
- Ruch, P., Bapsi, A. & Kübler, B. 1989: Talc: an indicator of recent anthropogenic activity. *Clay Miner.* 24, 1-8.
- Ruffaldi, P. 1996: Associations polliniques dans les pièges à sédiments du Lac de Neuchâtel (Suisse). No. *Laboratoire de Chrono-écologie, UMR9946, CNRS16*.
- Rumley, G. & Adatte, T. 1983: Méthode rapide de séparation des fractions <2 et 2-16 µm pour l'analyse par diffraction-X. (Cahiers de l'Institut de Géologie No. Série A.G.5). *Université de Neuchâtel*.
- Ruzicka, J. & Hansen, E.H. 1981: *Flow Injection Analysis*. Wiley Interscience, New York, p.
- Sampling, U.S.G.W.G.o.S.T.T.a. 1989: Sediment trap technology and sampling. No. *U.S. GFS planning report number 10*. U.S. Global Ocean Flux Study.
- Schardt, H. 1898: Sur l'origine des lacs du pied du Jura. *Bull. Soc. neuchât. Sci. nat.* 26, 395.
- Schelske, C.L. & Hodell, D.A. 1991: Recent changes in productivity and climate of Lake Ontario detected by isotopic analysis of sediments. *Limnol. Oceanogr.* 36, 961-975.
- Scheurer, R. 1989a: L'économie neuchâteloise au Moyen Age. In: *Histoire du Pays de Neuchâtel* (Ed. by I. Attinger, Hauterive, 263-284.
- Scheurer, R. 1989b: La société et le gouvernement des hommes. In: *Histoire du Pays de Neuchâtel* (Ed. by I. Attinger, Hauterive, 175-225.
- Schlüchter, C. 1988: The deglaciation of the Swiss Alps: a paleoclimatic event with chronological problems. *Bull. Assoc. franç. ét. Quat.* 2, 141-145.
- Schneider, J., Röhrs, J. & Jäger, P. 1990: Sedimentation and Eutrophication History of Austrian Alpine Lakes. In: *Large Lakes: Ecological Structure and Function* (Ed. by Tilzer, M.M. & Serruya, C.). Springer, Berlin, Heidelberg, 316-335.
- Schoellhammer, P. 1992: Fluctuations holocènes de la limite supérieure de la forêt dans le massif jurassien, influence du climat et des peuplements humains. DEA, Université d'Aix-Marseille.
- Schoellhammer, P. 1997: Recherches des signatures paléoclimatiques dans les remplissages lacustres postglaciaires du Locle (Neuchâtel, Suisse) et d'Ilay (Jura, France) à partir des analyses palynologiques, minéralogiques et géochimiques. Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel.
- Schotterer, U., Stocker, T., Hunziker, J., Buttet, P. & Tripet, J.-P. 1995: Isotope in Wasserkreislauf. Ein neues eidgenössisches Messnetz. *Gas, Wasser, Abwasser* 9/95 (75. Jahrgang), 1-8.
- Schwab, H. & Müller, R. 1973: Die Vergangenheit des Seelandes im neuen Licht, über die Wasserstände der Juraseen. -2. Juragewässerkorrektur. *Archäologie*. Universitätsverlag, Fribourg. 179 p.
- Schwalb, A. 1992: Die Sedimente des Lac de Neuchâtel (Schweiz): Rekonstruktion spät- und postglazialer Klima- und Umweltveränderungen. Ph.D. Thesis, Université de Neuchâtel.
- Schwalb, A., Lister, G. & Kelts, K. 1994: Ostracode carbonate δ¹⁸O- and δ¹³C-signatures of hydrological and climatic changes affecting Lake Neuchâtel, Switzerland, since the latest Pleistocene. *J. Paleolimn.* 11, 3-17.

- Seki, H., Skelding, J. & Parsons, T.R. 1968: Observations on the decomposition of a marine sediment. *Limnol. Oceanogr.* 13, 440-447.
- Sharma, T. & Clayton, R.M. 1965: Measurements of $\delta^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of total oxygen of carbonates. *Geoch. Cosmoch. Acta* 29, 1347-1353.
- Siegenthaler, U. & Oeschger, H. 1980: Correlation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation with temperature and altitude. *Nature* 285, 314-317.
- Simola, H. 1981: Sedimentation in a eutrophic stratified lake in S.Finland. *Ann. Bot. Fenn.* 18, 23-36.
- Sollberger, H. 1974: Le Lac de Neuchâtel (Suisse). Ses eaux, ses sédiments, ses courants sous-lacustres. Ph.D. Thesis. Université de Neuchâtel.
- Stabel, H.-H. 1985: Mechanisms controlling the sedimentation sequence of various elements in prealpine lakes. In: *Chemical processes in lakes* (Ed. by Stumm, W.). Wiley, New York, 143-167.
- Stabel, H.-H. 1986: Calcite precipitation in Lake Constance: Chemical equilibrium, sedimentation, and nucleation by algae. *Limnol. Oceanogr.* 31, 1081-1093.
- Straub, F. 1990: Hauterive-Champréveyres. 4. Diatomées et reconstitution des environnements préhistoriques. *Archéol. neuchâteloise* 10, 120pp.
- Straub, F. 1993: Diatoms and their preservation in the sediments of Lake Neuchâtel (Switzerland) as evidence of past hydrological changes. *Hydrobiologia* 269/270, 167-178.
- Stuiver, M. 1970: Oxygen and carbon isotope ratios of fresh-water carbonates as climatic indicators. *J. Geophys. Res.* 75, 5247-5257.
- Sturm, M., Zeh, U., Müller, J., Sigg, L. & Stabel, H.-H. 1982: Schwebstoffuntersuchungen im Bodensee mit Intervall-Sedimentationsfallen. *Eclogae geol. Helv.* 75, 579-588.
- Swart, P.K., Burns, S.J. & Leder, J.J. 1991: Fractionation of the stable isotopes of oxygen and carbon in carbon dioxide during the reaction of calcite with phosphoric acid as a function of temperature and technique. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)* 86, 89-96.
- Talbot, M.R. 1990: A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates. *Chem. Geol., Isot. Geosci. Sect.* 80, 261-279.
- Talbot, M.R. & Kelts, K. 1990: Palaeolimnological Signatures from Carbon and Oxygen Isotopic Ratios in carbonates from organic carbon-rich lacustrine sediments. In: *Lacustrine basin exploration: case studies and modern analogs* (Ed. by Katz, B.J.). AAPG Memoir 50, 99-112.
- Thierrin, J. 1990: Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse occidentale). Thèse de 3ème cycle, Université de Neuchâtel.
- Thomas, R.L., Santiago, S., Gandnis, V., Zhang, L. & Vernet, J.-P. 1991: Forms of Particulate Phosphorus and the Sediment Carbon/Nitrogen Ratio as Indicators of Phosphorus Origins in Aquatic Systems. *Water Poll. Res. J. Canada* 26, 433-451.
- Thompson, R., Battarbee, R.W., O'Sullivan, P.E. & Oldfield, F. 1975: Magnetic susceptibility of lake sediments. *Limnol. Oceanogr.* 20, 687-698.
- Thunus, V., Zuur, E., Lambert, P. & Godet, C.-H. 1994: A numerical simulation of transport and sedimentation of suspended particles in Lake Neuchâtel. *Eclogae geol. Helv.* 87, 385-402.
- Tulp, M.I.M. & Hutzinger, O. 1978: Some thoughts on aqueous solubilities and partition coefficients of PCB, and the mathematical correlation between bioaccumulation and physicochemical properties. *Chemosphere* 7, 849-860.
- Turberg, P. 1987: Essai de caractérisation minéralogique et géochimique de sédiments post-glaciaires en milieu lacustre. Hauterive-Champréveyres. Diplôme de géologue. Université de Neuchâtel.
- Turner, J.V., Fritz, P., Karrow, P.F. & Warner, B.G. 1983: Isotopic and geochemical composition of marl lake waters and implications for radiocarbon dating of marl lake sediments. *Canadian Journal of Earth Sciences* 20, 599-615.
- Vernet, J.-P. 1963: Le Sidérolithique du Mormont. *Bull. Soc. vaud. Sci. nat.* 68, 313-331.
- Vesper, B. 1975: Ein Beitrag zur Ostracodenfauna Schleswig-Holsteins. *Mitt. Hamburg. Zool. Mus. Inst.* 72, 97-108.
- von Grafenstein, U., Erlenkeuser, H., Müller, J. & Kleinmann-Eisenmann, A. 1992: Oxygen isotope records of benthic ostracods in bavarian lake sediments - Reconstruction of late and post glacial air temperature. *Naturwissenschaften* 79, 145-152.
- von Grafenstein, U., Erlenkeuser, H., Müller, J., Trimborn, P. & Alefs, J. 1996: A 200 year mid-European air temperature record preserved in lake sediments: An extension of the $\delta^{18}\text{O}$ -air temperature relation into the past. *Geochim. cosmochim. Acta* 60, 4025-4036.
- von Grafenstein, U., Erlenkeuser, H., Brauer, A., Jouzel, J. and Johnsen, S.J. 1999b. A Mid-European decadal isotope-climate record from 15,500 to 5,000 years B.P. *Science* 284: 1654-1657.
- von Grafenstein, U., Erlenkeuser, H. and Trimborn, P. 1999a. Oxygen and carbon isotopes in modern fresh-water ostracod valves: assessing vital offsets and autecological effects of interest for palaeoclimate studies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 148: 133-152.
- Wakefield, S. & O'Sullivan, G.M. 1996: The inorganic geochemistry of a Mediterranean Ridge mud breccia. *Marine Geol.* 132, 203-214.
- Weber, H. 1981: Sedimentologische und Geochemische Untersuchungen im Greifensee (Kanton Zürich, Schweiz). Mitteilungen aus dem geologischen Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule und der Universität Zürich, Neue Folge N.F. 237, 204pp.
- Wegmüller, S. 1966: Über die spär- und postglaziale Vegetationsgeschichte des Südwestlichen Jura. Beiträge zur geobot. Landesaufnahme der Schweiz 48, 144 pp.

Références bibliographiques

- Wegmüller, S. 1977: Pollenanalytische Untersuchungen zur spät- und postglazialen Vegetationsgeschichte der französischen Alpen (Dauphiné). Verlag Paul Haupt, Bern.
- Wellton, J.E. 1984: SEM Petrology Atlas. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, p.
- Wetzel, R.G. 1983: Limnology. Saunders College Publishing, Fort Worth, 767 p.
- Wigley, T.M.L. & Plummer, L.N. 1976: Mixing of carbonate waters. *Geochim. cosmochim. Acta* 40, 989-995.
- Williams, J.D.H., Shear, H. & Thomas, R.L. 1980: Availability to *Scenedesmus quadricauda* of different forms of phosphorus in sedimentary materials from the Great Lakes. *Limnol. Oceanogr.* 25, 1-11.
- Wohlfarth, B. & Ammann, B. 1991: The History of the River Aare and the Forealpine Lakes in Western Switzerland. In: *Fluvial Processes in the temperate Zone During the Last 15000yrs.* (Ed. by Gregory, L.K., Thornes, J.B. & Starkel, L.). Wiley, J., New York, 301-318.
- Wright, R.F. & Nydegger, P. 1980: Sedimentation of detrital particulate matter in lakes: Influence of currents produced by inflowing rivers. *Water Resources Research* 16, 597-601.
- Wüest, A. 1995: Prozesse in Seen und deren Modell-Beschreibung. In: *Eindimensionale Modellierung biogeochemischer Prozesse in Seen* (Kapitel 2a). No. EAWAG / SPPU Modul 2.
- Wüthrich, M. 1960: Etude des sédiments du lac de Neuchâtel: les Diatomées. *Bull. Soc. neuchât. Sci. nat.* 83, 1-40.
- Wüthrich, M. 1961: Etude des sédiments du lac de Neuchâtel: les Diatomées. *Bull. Soc. neuchât. Sci. nat.* 84, 1-33.
- Wüthrich, M. 1965: Le phytoplancton du lac de Neuchâtel. *Schweiz. Z. Hydrol.* 27, 1-75.
- Zimmermann, M.A., Kübler, B., Oerli, H.J., Frautsehi, J.M., Monnier, F., Deres, F. & Monbaron, H. 1976: Molasse d'eau douce inférieure du Plateau suisse - subdivision par l'indice de détritisme. Essai de datations par Naniofossiles. *Bull. Centre Rech. Pau - SNPA* 10, 585-625.
- Zoller, H. 1977: Alter und Ausmass postglazialer Klimaschwankungen in den Schweizer Alpen. *Erdwiss. Forsch.* 13, 271-281.
- Zoller, H., Schindler, C. & Röhliisberger, H. 1966: Postglaziale Gletscherstände und Klimaschwankungen im Gotthardmassiv und Vorderrheingebiet. *Verh. Naturf. Ges. Basel* 77, 97-164.
- Zuur, E. & Dietrich, D.E. 1990: The SOMS model and its application to Lake Neuchâtel. *Aquatic Sciences* 52, 115-129.

Annexes

Les symboles des échantillons se réfèrent soit aux stations d'analyse de l'eau (cf. Annexe 3.2.), soit aux stations de pièges à sédiments ou encore aux stations de prélèvement des carottes courtes

Annexe 2.1. Comparaison des résultats selon les différentes méthodes de préparation et d'analyse granulométrique

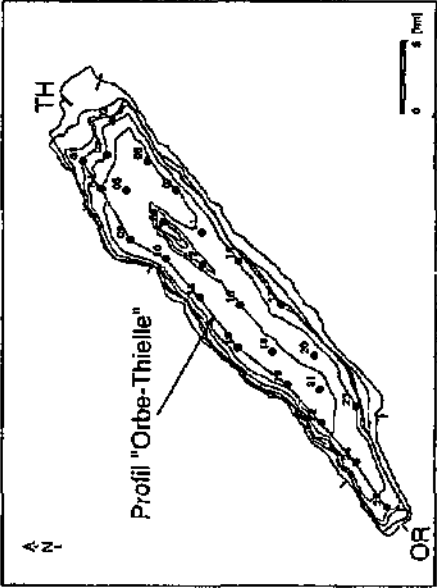
échantillon	prof m/cm	0.5-1 µm	1à2 µm	2à4 µm	4à8 µm	8à16 µm	16-31 µm	31-62 µm	62-124 µm	124-150 µm	médiane µm	moyenne µm
EAU DU LAC												
cuvette												
COCH0101: 14h34	30	0.65	4.19	27.08	55.92	12.16	0.00	0.00	0.00	0.00		
COCH0101: 14h35	30	0.83	4.30	28.47	48.77	17.63	0.00	0.00	0.00	0.00		
COCH0101: 14h36	30	0.66	3.79	23.95	34.69	36.90	0.00	0.00	0.00	0.00		
moyenne 14h34-36											5.14	5.92
COCH0101: 14h42	30	0.47	2.98	15.78	41.03	27.44	12.29	0.00	0.00	0.00	6.34	8.32
flot liquide												
COCH0101	30	6.78	11.41	36.2	44.12	1.49	0	0	0	0	3.79	3.66
COCH0101	30	2.75	9.89	38.78	46.36	2.22	0	0	0	0	3.89	3.86
TOSE2503	60	31.12	13.21	23.2	26.78	5.69	0	0	0	0	2.7	3.01
TOSE2503	60	30.34	13.62	20.85	31.91	3.28	0	0	0	0	2.57	3.09
PIEGES												
sans H2O2												
chevroux12.92	30	0.04	0.12	0.76	2.02	3.48	7.09	23.92	35.51	27.06	89.95	85.13
cortaillo12.92	30	0.22	0.48	2.33	10.53	12.87	23.57	37.72	12.28	0.00	29.39	34.83
cortaillo12.92	30	0.13	0.26	1.34	4.46	5.20	15.82	32.37	37.54	2.88	50.64	55.06
cortaillo12.92	30	0.10	0.18	1.31	5.83	5.34	14.86	30.64	33.31	8.43	54.22	60.94
st dev		0.88	0.16	0.65	3.58	4.18	6.74	5.69	11.71	12.16	25.12	20.71
avec H2O2												
chevroux12.92	30	0.76	3.43	15.62	21.87	10.23	17.67	16.53	13.89	0	13.02	25.05
cortaillo 2.5% H2O2	30	0.24	3.48	11.77	18.1	10.21	13.73	34.74	7.73	0	22.15	30.88
cortaillo 5% H2O2	30	1.55	4.01	16.45	23.56	11.84	12.76	22.58	2.60	4.65	9.53	23.63
cortaillo 10% H2O2	30	1.88	4.59	17.6	26.12	12.41	14.6	18.85	3.95	0	7.17	17.19
cortaillo 15% H2O2	30	0.34	3.12	12.23	16.01	7.97	13.95	27.75	12.76	5.87	28.38	37.38
toilerones12.92	60	2.06	6.2	21.38	33.91	15.19	14.43	6.83	0	0	5.61	9.85
toilerones12.92	60	2.40	7.25	26.44	40.37	15.84	7.7	0	0	0	4.72	6.37
toilerones12.92	60	2.32	6.55	23.13	32.89	17.89	15.91	1.31	0	0	5.38	8.57
stdev		0.18	0.53	2.57	4.06	1.41	4.38	3.62	0.00	0.00	0.46	1.76
CAROTTES												
cuvette												
C2630:13h04	30	8.30	14.07	28.11	43.47	6.05	0.00	0.00	0.00	0.00	4.05	4.18
C2630:13h21	30	0.83	3.44	15.86	33.56	28.96	17.35	0.00	0.00	0.00	7.18	9.21
C2630:13h29	30	0.78	3.21	15.42	32.30	26.49	21.80	0.00	0.00	0.00	7.03	9.88
st dev		4.33	6.20	7.20	6.12	12.57	11.52	0.00	0.00	0.00	1.77	3.12
flot liquide												
C19c-1(A)	1	2.24	6.60	25.33	39.72	16.72	9.12	0.28	0.00	0.00	4.87	6.97
C19c-1(B)	1	2.20	6.55	24.57	36.36	16.21	10.40	3.71	0.00	0.00	4.97	8.34
C19c-1(C)	1	2.34	6.68	24.80	39.71	17.03	9.44	0.00	0.00	0.00	4.97	6.90
st dev		0.07	0.07	0.39	1.94	0.41	0.67	2.07	0.00	0.00	0.06	0.81
sans ultrasons												
C19c-21	21	1.90	7.42	25.10	33.95	13.93	4.35	0.00	0.00	0.00	4.98	8.84
C19c-25	25	2.19	8.68	28.54	36.96	13.30	7.56	2.76	0.00	0.00	4.54	7.08
C19c-29	29	2.11	8.20	27.16	36.66	14.17	10.78	0.91	0.00	0.00	4.67	7.19
C19c-33	33	1.59	6.86	25.98	34.85	13.46	13.59	3.68	0.00	0.00	4.93	9.03
C19c-37	37	1.67	6.71	22.60	31.96	14.58	13.75	8.73	0.00	0.00	5.51	10.71
C19c-41	41	1.79	6.80	22.41	30.23	12.54	14.44	11.80	0.00	0.00	5.54	11.90
C19c-45	45	1.43	5.15	16.85	24.76	13.32	18.26	20.22	0.00	0.00	8.96	15.88
st dev		0.28	1.15	3.90	4.28	0.67	4.66	7.25	0.00	0.00	1.53	3.09
avec ultrasons												
C19c-21	21	4.27	14.64	39.33	35.27	6.09	0.40	0.00	0.00	0.00	3.64	3.96
C19c-25	25	4.47	12.07	36.16	37.92	7.49	1.89	0.00	0.00	0.00	3.87	4.53
C19c-29	29	4.15	11.84	36.33	36.85	8.49	2.34	0.00	0.00	0.00	3.90	4.88
C19c-33	33	5.98	15.09	38.26	35.07	5.38	0.21	0.00	0.00	0.00	3.59	3.87
C19c-37	37	6.54	14.34	36.76	35.49	6.40	0.27	0.00	0.00	0.00	3.66	3.93
C19c-41	41	3.96	12.43	35.03	38.64	8.64	1.31	0.00	0.00	0.00	3.93	4.52
C19c-45	45	5.60	11.71	33.07	37.71	10.33	1.58	0.00	0.00	0.00	3.98	4.67
st dev		1.03	1.49	2.05	1.44	1.73	0.86	0.00	0.00	0.00	0.16	0.37

Annexe 3.1. Liste des campagnes de mesures

SERIE	DATE	TYPE	COMMENTAIRES
1	10.6.92	TRANSVERSALES	
2	30.6.92	TRANSVERSALES	
3	14.7.92	TRANSVERSALES	
4	3.8.92	LONGITUDINALES	
5	4.8.92	TRANSVERSALES	
6	19.8.92	TRANSVERSALES	
7	7.9.92	TRANSVERSALES	
8	17.9.92	LONGITUDINALES	
9	3.10.92	LONGITUDINALES	CAMPAGNE INCOMPLETE
10	16.10.92	TRANSVERSALES	CAMPAGNE INCOMPLETE
11	5.11.92	TRANSVERSALES	
12	10.12.92	TRANSVERSALES	
13	18.1.93	TRANSVERSALES	
14	4.3.93	TRANSVERSALES	capteur pH hors d'usage
15	8.4.93	TRANSVERSALES	
16	14.4.93	LONGITUDINALES	
17	21.4.93	TRANSVERSALES	
18	27.4.93	STATION TOSE3	
19	6.5.93	STATION TOSE3	
20	10.5.93	LONGITUDINALES	
21	18.5.93	TRANSVERSALES	
22	25.5.93	STATION TOSE3	
23	4.6.93	STATION TOSE3	
24	9.6.93	LONGITUDINALES	
25	15.6.93	TRANSVERSALES	
26	23.6.93	STATION TOSE3	
27	28.6.93	INTENSIVES	
28	28.6.93(nuit)	INTENSIVES	CAMPAGNE INCOMPLETE (2 STAT.)
29	29.6.93	INTENSIVES	
30	29.6.93(nuit)	INTENSIVES	CAMPAGNE INCOMPLETE (TOSE3 OK)
31	30.6.93	INTENSIVES	
32	30.6.93(nuit)	INTENSIVES	
33	7.7.93	STATION TOSE3	
34	14.7.93	TRANSVERSALES	
35	22.7.93	STATION TOSE3	
36	27.7.93	STATION TOSE3	
37	30.7.93	LA RAISSE	
38	3.8.93	AQUARIUS	
39	5.8.93	STATION TOSE3	
40	12.8.93	STATION TOSE3	
41	16.8.93	INTENSIVES	
42	16.8.93(nuit)	INTENSIVES	
43	17.8.93	INTENSIVES	
44	17.8.93(NUIT)	INTENSIVES	
45	18.8.93	INTENSIVES	
46	18.8.93(NUIT)	INTENSIVES	
47	26.8.93	STATION TOSE3	
48	31.8.93	TRANSVERSALES	
49	10.9.93	STATION TOSE3	
50	17.9.93	STATION TOSE3	
51	24.9.93	LONGITUDINALES	
52	14.10.93	STATION TOSE3	
53	21.10.93	STATION TOSE3	
54	10.11.93	STATION TOSE3	
55	24.11.93	HIVERNALES	
56	19.1.94	HIVERNALES	
57	31.1.94	PIEGES	BA+CO
58	4.3.94	HIVERNALES	
59	8.3.94	PIEGES	BA+CO+CH
60	20.4.94	PIEGES	BA+CO
61	25.4.94	HIVERNALES	
62	24.5.94	PIEGES	BA+CO
63	31.5.94	HIVERNALES	
64	22.6.94	HIVERNALES	
65	6.7.94	PIEGES	BA+CO+CH
66	27.7.94	HIVERNALES	
67	3.8.94	PRELEVEMENTS H2O	CAMPAGNE INCOMPLETE (2 STAT.)
68	10.8.94	PIEGES	BA+CO+CH
69	22.8.94	TRANSV. TURBIDITE	PROFIL COCH COMPLET (18 STAT.)
70	30.8.94	MESURES DE NUIT	CAMPAGNE INCOMPLETE (2 STAT.)
71	7.9.94	TRANSV. TURBIDITE	PROFIL COCH COMPLET (18 STAT.)
72	20.9.94	PIEGES	BA+CO+CH+TRANSV. RB09
73	3.10.94	TRANSV. TURBIDITE	PTE DU GRIN (7 STAT.)
74	18.10.94	PIEGES	BA+CO
75	7.11.94	PIEGES	BA+CO+CH
76	24.11.94	PIEGES	BA+CO+CH
77	6.12.94	TRANSV. TURBIDITE	PROFIL LARGE CHEVROUX
78	19.12.94	PIEGES	BA+CO+CH
79	24.1.95	TRANSV. TURBIDITE	PROFIL PTE GRIN-CHEVROUX (11 STAT.)
80	31.1.95	PIEGES	BA+CO+CH
81	8.2.95	AREUSE FLUORESCENCE	(10 STAT.)
82	24.3.95	PIEGES	BA+CO+CH

Annexe 3.2. Localisation des stations de mesures

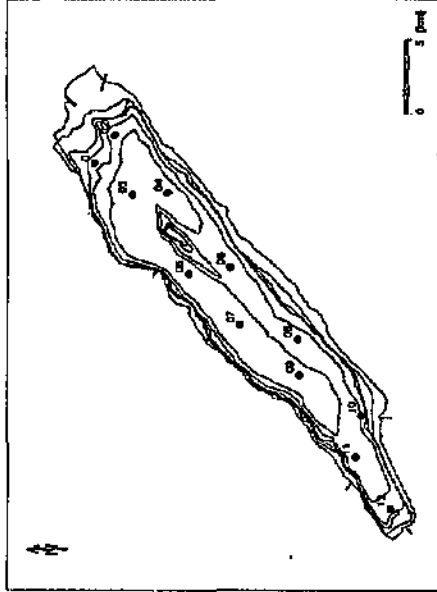
INTENSIVES



- 01 INTE01
- 02 INTE02
- 03 INTE03
- 04 INTE04
- 05 TOSE03
- 06 INTE06
- 07 INTE07
- 08 INTE08
- 09 INTE09
- 10 INTE10
- 11 INTE11
- 12 INTE12
- 13 INTE13
- 14 INTE14
- 15 INTE15
- 16 INTE16
- 17 INTE17
- 18 INTE18
- 19 INTE19
- 20 INTE20
- 21 INTE21
- 22 INTE22
- 23 INTE23
- 24 INTE24
- 25 INTE25

- 46 58.435 N, 006 57.923 E
- 46 58.310 N, 007 00.101 E
- 46 58.492 N, 006 58.246 E
- 46 58.700 N, 006 58.431 E
- 46 57.769 N, 006 58.321 E
- 46 57.006 N, 006 57.944 E
- 46 56.920 N, 006 56.378 E
- 46 58.452 N, 006 54.639 E
- 46 57.835 N, 006 53.681 E
- 46 58.308 N, 006 52.971 E
- 46 54.965 N, 006 54.102 E
- 46 54.937 N, 006 52.370 E
- 46 55.039 N, 006 50.636 E
- 46 53.609 N, 006 52.541 E
- 46 53.543 N, 006 50.219 E
- 46 53.612 N, 006 47.975 E
- 46 52.006 N, 006 50.278 E
- 46 52.288 N, 006 47.754 E
- 46 51.738 N, 006 46.039 E
- 46 50.776 N, 006 47.578 E
- 46 50.523 N, 006 45.809 E
- 46 50.458 N, 006 44.000 E
- 46 49.195 N, 006 44.882 E
- 46 49.149 N, 006 41.904 E
- 46 47.973 N, 006 39.553 E

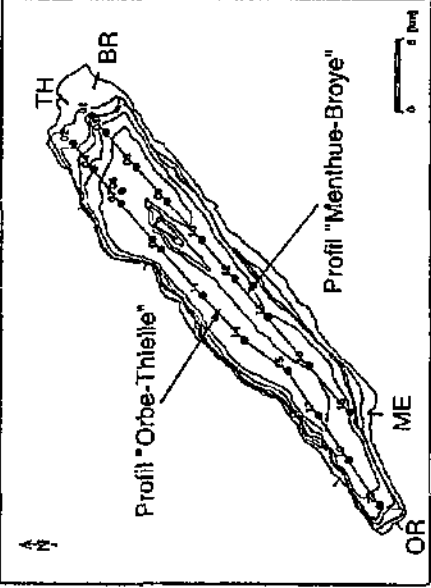
HIVERNALES



- 01 HIVE 01
- 02 HIVE 02
- 03 HIVE 03
- 04 HIVE 04
- 05 HIVE 05
- 06 HIVE 06
- 07 HIVE 07
- 08 HIVE 08
- 09 HIVE 09
- 10 HIVE 10
- 11 HIVE 11
- 12 HIVE 12

- 46 59.165 N, 006 57.925 E
- 46 58.429 N, 006 59.390 E
- 46 57.795 N, 006 56.242 E
- 46 58.460 N, 006 56.373 E
- 46 55.867 N, 006 52.085 E
- 46 54.121 N, 006 52.457 E
- 46 53.727 N, 006 49.312 E
- 46 51.524 N, 006 48.550 E
- 46 51.472 N, 006 46.662 E
- 46 49.138 N, 006 44.490 E
- 46 49.387 N, 006 42.285 E
- 46 47.987 N, 006 39.572 E

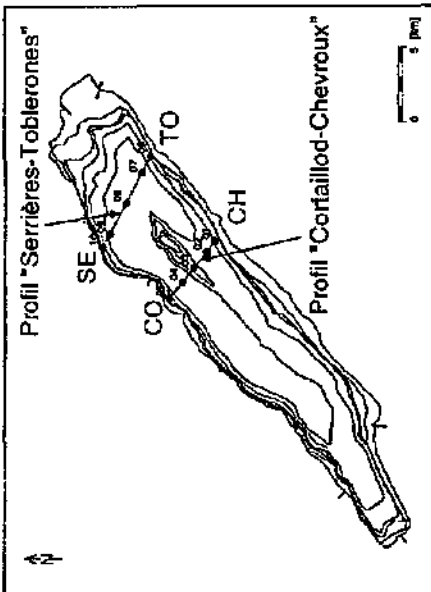
LONGITUDINALES



- 01 MEBR 09
- 02 ORTH 10
- 03 MEBR 08
- 04 ORTH 06
- 05 MEBR 07
- 06 TOSE 03
- 07 ORTH 06
- 08 MEBR 08
- 09 ORTH 07
- 10 MEBR 05
- 11 ORTH 08
- 12 MEBR 04
- 13 MEBR 03
- 14 ORTH 05
- 15 ORTH 04
- 16 MEBR 02
- 17 ORTH 03
- 18 MEBR 01
- 19 ORTH 02
- 20 ORTH 01

- 46 58.972 N, 007 00.283 E
- 46 55.941 N, 006 58.788 E
- 46 58.429 N, 006 59.390 E
- 46 58.853 N, 006 57.395 E
- 46 57.281 N, 006 57.528 E
- 46 57.795 N, 006 56.242 E
- 46 57.815 N, 006 55.552 E
- 46 56.062 N, 006 55.626 E
- 46 56.326 N, 006 53.025 E
- 46 54.806 N, 006 53.572 E
- 46 54.732 N, 006 50.619 E
- 46 53.531 N, 006 51.519 E
- 46 52.257 N, 006 49.466 E
- 46 53.127 N, 006 48.224 E
- 46 51.472 N, 006 46.662 E
- 46 50.705 N, 006 46.947 E
- 46 50.311 N, 006 44.297 E
- 46 49.138 N, 006 44.400 E
- 46 49.149 N, 006 41.934 E
- 46 47.987 N, 006 39.572 E

TRANSVERSALES



- 01 COCH 03
- 02 COCH 04
- 03 COCH 03
- 04 COCH 02
- 05 COCH 01
- 06 TOSE 01
- 07 TOSE 02
- 08 TOSE 03
- 09 TOSE 04
- 10 TOSE 05

- 46 54.450 N, 006 54.284 E
- 46 54.746 N, 006 53.711 E
- 46 55.229 N, 006 52.839 E
- 46 55.657 N, 006 52.096 E
- 46 58.141 N, 006 51.211 E
- 46 58.884 N, 006 56.730 E
- 46 57.195 N, 006 57.824 E
- 46 57.795 N, 006 56.242 E
- 46 54.395 N, 006 54.626 E
- 46 53.673 N, 006 53.936 E

Annexe 3.3.: Analyses de phytoplancton

date	3.10.92	8.4.93	27.4.93	10.5.93	18.5.93	4.6.93	28.6.93	14.7.93	27.7.93	12.8.93	31.8.93	10.9.93	21.10.93	10.11.93	filet
CYANOPHYCEES(ind/ml)															présent
Anabaena microspora					1										
Aphanizomenon flus aquae										1	1	1		4	
Aphanizomenon elabrum								1			1	2			
Merismopedia sp.						1									
Oscillatoria cf. limosa															présent
Oscillatoria limnetica	1528		4								232	58		2	
Oscillatoria limnetica f. nebulosa	216														
Oscillatoria limnetica var. nebulosissima															
Oscillatoria rubescens	272	1	16	4	1						1	1	56	52	abondant
Oscillatoria sp.															
Phormidium autumnale															
Pseudanabaena paleata	8									1					
CRYPTOPHYCEES(ind/ml)															
Cryptomonas sp.	0.2										1		1	1	
Cryptomonas nana	0.2														
Cryptomonas ovata												1			
Rhodomonas minuta	130		28		1							2			
Rhodomonas minuta var. nanoplantica	152		104	1						6	22	12			
DINOPHYCEES(ind/ml)															
Ceratium hirundinella	8	1	4	1	1	12		2		2	1	2		1	
Ceratium hirundinella (cyste)						4									
Gymnodinium excavatum	0.2							2			1	1			
Gymnodinium hantzschii			4								1				
Gymnodinium helveticum			4								1			1	
Gymnodinium sp.										1					
Pendinopsis sp.	0.2														
Pendinopsis cunninghamii											1	1			
Pendinopsis elpuiewski										1					
Pendinium cinctum						2									
Pendinium lacunosum								6	1	1					
Pendinium willii	0.2	1	4			1	4				1	1			présent
EUGLENOPHYCEES(ind/ml)															
Trachelomonas sp.															
CHRYSDOPHYCEES(ind/ml)															
Bicosoca campanulata												2			
Biridictia chudatzi	0.2											1			
Chrysosphaera planctonica															
Dinobryon bavaricum	32		1					330	16	26	24	20		1	
Dinobryon sociale var. americanum	0.2														
Dinobryon sociale var. stipitatum			100		1										
Dinobryon sociale	80			21		5	48		56	2					
Dinobryon divergens	0.2	1	52	3		39	40	22	88	30	112	68		1	présent
Dinobryon elegantissimum			52					96	6	6					
Dinobryon setulifera	0.2									1					
Erkenia subacuminatula	40		196		8				8	2		2			
Repliyton sp.	16							2							
Mallomonas minima											1	1			
DIATOMIDES(ind/ml)															
Achnanthes ciliata															présent
Achnanthes minutissima															présent
Amphura sp.	0.2														
Amphura ovalis															présent
Amphura pediculus			1								1				présent
Ascionella bimosa	0.2					1	8	4	54	1	1	1	1	12	présent
Aulacoseira granulata		10									1	1			
Aulacoseira granulata var. angustissima														1	
Aulacoseira islandica															
Aulacoseira islandica subsp. helvetica										1					présent
Aulacoseira subarctica			1												
Cocconeis pediculus															présent
Cocconeis placentula															présent
Cyclotella cf. choisei	1408		1		1	2		1		160	404	164		160	présent
Cyclotella cf. wilfrichiana	1408														
Cyclotella nebulosa										1	400	160			présent
Cyclotella radiosa		1									12	1	1	1	présent
Cyclotella sp.								2							
Cymatopleura selena		1													
Cymbella sp.											1				présent
Diatoma elongatum	24														
Diatoma tenue			48					4	36	2	1	1		1	présent
Diatoma vulgare											1				
Diploneis ovalis															
Frustulia capricornis				7											extrém. ab.
Frustulia crumenaensis	0.2	13	20				3016	14	1	1	1	32	1	86	très ab.
Frustulia pinnata															présent
Meleteria varians															présent
Navicula sp.						1		1		2	1	1			
Navicula rubra															présent
Navicula tripunctata															présent
Neidium affine															présent
Neidium bimide						1					1				
Nitzschia helvetica										1					présent
Nitzschia sp.						1		1							présent
Stauroneis anceps											1				
Stephanodiscus alpinus										1					présent
Stephanodiscus minutulus								2						30	

Annexe 3.3.: Analyses de phytoplancton

date	3.10.92	8.4.93	27.4.93	10.5.93	18.5.93	4.6.93	28.6.93	14.7.93	27.7.93	13.8.93	31.8.93	10.9.93	21.10.93	10.11.93	Mer
<i>Stephanodiscus neoastraea</i>		1												1	présent
<i>Synedra acus</i> var. <i>angustissima</i>	24		8						4	10	8		1	2	présent
<i>Synedra nana</i>	0.2														
<i>Synedra radians</i>								6	38	22		8			
<i>Tabellaria fenestrata</i>	0.2		20				24		1	1					
CHLOROPHYTES (ind./ml)															
<i>Botryococcus braunii</i>											1	1			
<i>Chlorella vulgaris</i>	72		260	33	240		80		80	80	216			52	
<i>Chlorella minutissima</i>															
<i>Coelastrum astroides</i>	0.2														
<i>Coelastrum reticulatum</i>	0.2										1	2			
<i>Coenocysis subcylindrica</i>															
<i>Coelastrum tetrapedii</i>	16										2	4			
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	0.2														
<i>Elaktonothrix gelatinosa</i>															
<i>Eudorina elegans</i>															
<i>Hyalophyllum contortum</i>															
<i>Kriegerella cf. constricta</i>															
<i>Lagerheimia longicella</i>															
<i>Microcystium pusillum</i>	0.2														
<i>Monoraphidium sp.</i>	8														
<i>Monoraphidium minutum</i>															
<i>Oocystis lacustris</i>	40														
<i>Oocystis salina</i>															
<i>Pediastrum bogovinum</i>	0.2														présent
<i>Pediastrum duplex</i>	0.2														
<i>Phacelus tendonei</i>	138						32								présent
<i>Planctosphaeria gelatinosa</i>															
<i>Rayssacella hemisphaerica</i>															
<i>Richterella hantzschii</i>															
<i>Scenedesmus</i> sp.	0.2														présent
<i>Scenedesmus dispar</i>															
<i>Scenedesmus intermedius</i> var. <i>caudatum</i>															
<i>Scenedesmus magnus</i>															
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.2														
<i>Sphaerocystis schroeteri</i>															
<i>Tetrahymena alternans</i>															
<i>Tetradon minimum</i>															
<i>Tetrasira triangularis</i>	0.2														
<i>Willen irregularis</i>															
ZYGOPHYTES (ind./ml)															
<i>Chlorella acutum</i> var. <i>variable</i>	0.2														
<i>Chlorella nocardii</i>															
<i>Cosmarium biretum</i> var. <i>trigibberum</i>															
<i>Cosmarium biretum</i>															présent
<i>Cosmarium granatum</i>															présent
<i>Cosmarium laeve</i>															
<i>Myrionecta gracillima</i>	0.2		24				24	36	92	14	11	1			
<i>Staurastrum cingulum</i>			24				1								
<i>Staurastrum cf. pinnatum</i>															
<i>Staurastrum cf. sebalii</i>															présent
<i>Staurastrum sp.</i>															
Biomasse (µg/l)	134.26	1007.1	72.28	66.73	786.55	1751.2	731.05	518.2	784.61	693.15	386.87	207.47	328.9		

Annexe 3.4. Analyses chimiques de l'eau

date	profondeur	Mg2+(mg/l)	Ca2+(mg/l)	PD4(µg/l)	NO3(mg/l)	SO4(mg/l)	SiO2(mg/l)	TOC(mg/l)
10.6.92	10	6.06	50.80	37.75	4.51		0.63	2.35
10.6.92	30	5.97	51.07	29.00	4.92		0.80	2.33
10.6.92	60	5.92	50.85	39.00	4.85		0.84	1.70
10.6.92	85	5.85	51.09	74.00	4.84		0.90	2.05
10.6.92	130	5.73	51.44	55.50	4.72		1.06	1.81
30.6.92	10	6.01	49.89	21.71			0.59	2.12
30.6.92	30	5.99	50.66	9.00			0.78	2.17
30.6.92	60	6.02	50.34	14.33			0.85	2.09
30.6.92	74	5.98	50.66	13.00			1.07	3.23
30.6.92	126	6.02	50.87	25.00			1.25	2.26
30.6.92	139	5.96	50.84	18.00			1.07	2.14
4.8.92	7	5.94	43.48	13.38	3.44		0.18	3.20
4.8.92	10	5.85	44.45	23.50	3.44		0.20	2.98
4.8.92	15	6.03	49.37	23.33	4.53		0.67	3.12
4.8.92	30	6.00	50.87	5.33	4.81		1.46	3.27
4.8.92	60	6.07	50.83	20.67	4.71		1.81	3.03
4.8.92	78	6.00	51.10	15.00	4.91		2.03	2.86
4.8.92	126	5.90	51.20	15.00	4.32		3.29	3.28
4.8.92	137	5.80	51.50	19.00	4.64		2.75	2.84
19.8.92	5	5.70	42.58	13.40	3.15		0.23	2.94
19.8.92	15	5.87	47.83	6.67	3.94		0.56	2.84
19.8.92	30	5.67	51.73	8.67	5.01		1.58	2.67
19.8.92	60	5.77	51.67	45.33	4.97		1.99	2.46
19.8.92	77	5.60	52.20	15.00	4.51		2.21	2.79
19.8.92	126	5.80	52.00	35.50	4.18		3.03	2.55
19.8.92	137	5.90	52.80	35.50	4.12		3.92	2.62
7.9.92	8	6.18	42.83	26.25	3.78		0.19	
7.9.92	18	6.15	48.60	11.50	4.79		0.87	
7.9.92	26	6.10	49.90	20.00	4.97		1.21	
7.9.92	50	6.05	51.35	60.00	5.16		1.88	
7.9.92	77	6.10	50.80	49.00	5.03		2.17	
7.9.92	137	6.10	51.40	95.00	4.65		3.33	
3.10.92	5	6.10	42.80	8.00	3.22	12.30	0.10	2.60
3.10.92	11	6.05	42.85	15.50	3.47	11.75	0.23	2.78
3.10.92	16	6.15	43.45	13.25	3.51	12.70	0.24	2.66
3.10.92	20	5.90	48.70	14.00	4.48	12.00	0.67	2.43
3.10.92	30	6.00	50.80	10.00	4.83	12.00	0.99	2.18
3.10.92	60	6.00	50.90	29.00	4.81	12.10	1.28	2.36
16.10.92	7	6.09	44.32	14.47	4.47	10.26	0.40	2.83
16.10.92	20	6.04	45.81	19.80	4.38	10.80	0.45	2.43
16.10.92	50	6.01	50.86	19.80	5.02	9.99	1.70	2.63
5.11.92		6.08	46.77	15.00	4.42	10.05	0.80	2.52
5.11.92	5	6.00	47.08	27.30	4.76	9.83	0.83	2.56
5.11.92	22	5.99	47.95	51.90	4.76	9.48	1.10	2.69
5.11.92	30	5.88	48.50	19.80	5.05	10.01	1.03	2.57
5.11.92	60	5.81	51.35	23.87	5.33	10.40	1.90	2.30
5.11.92	72	5.78	51.32	35.30	5.36	10.70	2.15	2.39
5.11.92	138	5.78	51.72	48.70	4.61	10.10	2.70	2.28
10.12.92	10	6.09	49.52		4.55	13.7	1.70	
10.12.92	50	6.11	50.79		4.69	13.6	2.35	
10.12.92	78	6.03	52.37		4.81	13.8	2.98	
10.12.92	92	5.57	51.77		4.44	13.4	2.49	
18.1.93	0	5.83	51.01		4.49	13.8	1.79	
18.1.93	6	5.81	50.91		5.03	14.15	1.73	
18.1.93	16	5.81	51.34		4.98	14	1.76	
18.1.93	25	5.73	51.04		4.96	13.75	1.85	
18.1.93	40	5.88	50.73		4.92	15.30	1.87	
18.1.93	74	5.73	51.15		5.07	14.20	1.80	
18.1.93	100	5.81	50.84		4.95	13.60	1.86	
18.1.93	120	5.98	51.07		5.07	14.20	1.93	
18.1.93	137	5.84	51.30		5.07	13.70	2.06	
4.3.93	0	5.00	50.95	36.50	5.63	16.05	1.75	2.27
4.3.93	10	6.00	51.20	55.00	5.65	16.30	1.74	2.51
4.3.93	20	6.10	51.33	23.67	5.61	16.17	1.76	2.52
4.3.93	30	6.03	51.33	32.67	5.45	15.97	1.78	2.30
4.3.93	60	5.95	51.30	25.00	5.57	15.90	1.89	2.36
4.3.93	100	5.95	51.30	26.00	5.44	16.30	1.76	2.10
4.3.93	128	5.90	51.20	26.00	5.38	15.20	1.79	2.79
4.3.93	138	5.80	51.60	24.00	5.38	16.20	1.75	2.24
8.4.93	0	5.89	51.20	2.00	5.01	18.60	1.45	
8.4.93	5	6.01	51.01	2.00	5.13	18.20	1.52	
8.4.93	10	6.25	50.69	5.00	4.76	19.00	1.16	
8.4.93	15	5.93	51.30	6.00	4.99	18.40	1.36	
8.4.93	20	6.31	50.74	6.60	4.88	18.45	1.28	
8.4.93	30	6.03	51.08	2.33	5.20	17.87	1.32	
8.4.93	60	5.89	51.05	5.00	4.98	17.80	1.37	
8.4.93	100	6.11	50.95	19.00	5.23	18.00	1.49	
8.4.93	128	5.98	51.12	24.00	5.21	17.90	1.65	
8.4.93	138	5.69	51.07	2.00	5.18	17.60	1.49	
21.4.93	6	5.71	51.49		4.56	16.00	0.60	
21.4.93	10	5.75	51.45		4.80	15.30	1.03	
21.4.93	20	5.79	51.45		4.89	15.33	1.31	
21.4.93	30	5.74	51.26		4.98	14.97	1.50	
21.4.93	60	5.81	51.40		5.00	15.00	1.57	
21.4.93	100	5.81	51.46		5.13	14.80	1.76	
21.4.93	120	5.79	51.78		4.93	15.30	2.01	
21.4.93	138	5.79	51.33		5.02	14.30	1.74	

Annexe 3.4. Analyses chimiques de l'eau

date	profondeur	Mg2+(mg/l)	Ca2+(mg/l)	PO4(µg/l)	NO3(mg/l)	SO4(mg/l)	SiO2(mg/l)	TOC(mg/l)
6.5.93	5	5.86	52.05	21.3	4.83			
6.5.93	30	5.71	52.09	12.1	4.88			
6.5.93	60	6.00	51.91	25.8	4.88			
6.5.93	125	5.77	51.94	34.9	5.21			
18.5.93	0	5.90	49.70	20.00	3.94	12.80	1.00	3.21
18.5.93	10	5.75	49.75	20.50	4.00	12.60	1.00	2.69
18.5.93	15	5.72	50.70	25.00	4.25	12.30	1.10	2.65
18.5.93	20		51.45	21.00	4.66	12.35	1.35	2.68
18.5.93	30		51.33	13.33	4.88	12.73	1.50	2.66
18.5.93	60		51.30	26.00	5.04	12.73	1.63	2.54
18.5.93	100		51.40	39.00	5.10	13.10	1.80	2.63
18.5.93	125		51.80	46.00	5.06	12.80	2.30	2.50
18.5.93	138		51.70	46.00	4.95	12.10	2.10	2.56
15.6.93	5	5.73	49.35	22.50	3.55	11.60	1.21	
15.6.93	10	5.71	49.84	7.50	4.02	12.20	1.91	
15.6.93	20	5.70	51.83	17.50	4.55	11.65	1.81	
15.6.93	30	5.89	51.69	29.17	4.64	12.03	2.24	
15.6.93	35	5.52	52.32	32.50	4.61	11.95	2.08	
15.6.93	60	5.28	52.38	32.50	4.49	12.30	1.99	
15.6.93	100	5.96	51.65	50.00	4.45	12.70	2.20	
15.6.93	125	5.83	51.88	67.50	4.43	12.30	3.01	
14.7.93	0	5.82	47.06	7.50	4.35	13.67	0.37	2.63
14.7.93	6	5.96	46.63	0.50	4.41	14.10	0.26	4.47
14.7.93	10	5.79	47.42	2.75	4.54	13.85	0.25	2.65
14.7.93	20	5.85	50.27	11.17	5.38	13.87	0.97	2.58
14.7.93	30	5.76	51.55	6.83	5.68	14.43	1.47	2.46
14.7.93	60	5.66	51.87	32.67	5.97	14.73	1.84	2.34
14.7.93	100	5.85	51.71	40.00	5.75	15.30	2.10	2.45
14.7.93	126	5.87	52.72	53.00	5.54	16.20	2.90	2.40
14.7.93	138	5.72	52.42	65.00	6.07	15.80	2.79	2.49
31.8.93	0	5.75	44.10	0.00	3.82	14.93	0.18	2.84
31.8.93	5	5.79	44.46		4.73	15.15	1.93	2.93
31.8.93	10	5.71	44.67		3.96	14.50	0.26	2.61
31.8.93	20	5.63	50.31		4.60	15.45	0.63	2.50
31.8.93	30	5.72	51.07		5.56	15.03	1.39	2.47
31.8.93	60	5.76	51.84		5.66	15.37	1.90	2.36
31.8.93	100	5.83	51.83		5.73	15.70	2.01	2.73
31.8.93	125	5.98	52.45		5.73	15.10	2.14	2.48
31.8.93	138	5.88	52.33		5.27	14.90	2.87	2.47
23.11.93	0	6.20	51.16	24.50	5.27	15.25	1.37	
23.11.93	5	6.00	51.16	22.00	5.40	15.20	1.50	
23.11.93	10	6.15	51.06	13.50	5.68	13.25	1.41	
23.11.93	20	5.95	51.40	28.00	5.20	15.70	1.70	
23.11.93	30	6.14	51.24	25.00	4.93	12.50	1.54	
23.11.93	60	6.22	51.82	20.33	5.33	9.61	2.10	
23.11.93	100	6.07	51.83	24.00	5.20	9.02	1.84	
23.11.93	125	6.40	52.47	41.00	5.50	14.50	2.75	
23.11.93	138	5.88	52.52	44.00	5.40	15.50	2.48	
26.4.94	0			0.00	5.29		1.24	
26.4.94	5			0.00	5.29		1.20	
26.4.94	10			0.00	5.27		1.19	
26.4.94	20			7.33	5.33		1.38	
26.4.94	30			6.00	5.34		1.46	
26.4.94	60			17.33	5.45		1.80	
26.4.94	100			13.00	5.42		2.03	
26.4.94	126			26.00	5.50		2.29	
26.4.94	138			23.00	5.46		2.19	
31.5.94	5	7.20	52.60	54.2	5.75	14.9	1.23	2.79
31.5.94	20	6.00	53.70	24.8	6.04	10.7	1.48	2.42
31.5.94	30	5.90	53.00		6.13	10.7	1.6	2.25
31.5.94	60	6.00	52.70	29.3	6	7.05	1.84	2.3
31.5.94	100	6.00	53.50	54.2	5.59	10.8	2.13	2.35
31.5.94	126	5.90	52.70	45.1	5.81	10.5	2.51	2.91
22.6.94	0	6.10	51.50	17.00	4.70			
22.6.94	10	5.90	52.37	4.67	5.17			
22.6.94	20	5.93	52.80	4.00	5.60			
22.6.94	30	5.97	52.83	3.33	5.80			
22.6.94	60	5.87	52.57	21.33	5.93			
22.6.94	100	6.00	52.30	28.00	5.90			
22.6.94	126	6.10	52.60	38.00	5.90			
22.6.94	138	5.90	52.70	42.00	5.81			
26.7.94	0	6.00	45.70	0.00	3.90		0.00	
26.7.94	5	6.00	46.10	0.00	3.60		0.20	
26.7.94	10	6.00	47.35	0.00	3.40		0.20	
26.7.94	20	5.97	53.73	0.00	4.03		0.87	
26.7.94	30	5.57	54.03	0.00	5.73		1.17	
26.7.94	60	5.93	52.57	24.20	5.17		1.63	
26.7.94	100	5.50	53.90	40.00	7.00		2.00	
26.7.94	132	6.35	52.80	57.30	6.00		2.65	
3.8.94	5	5.90	43.33	0	3.8		0.9	
3.8.94	10	6.00	46.10	0	4.1		0.8	
3.8.94	20	5.90	52.70	0	5.3		1.6	
3.8.94	30	5.90	53.00	0	5.4		2	
3.8.94	60	5.90	52.60	22	5.5		2.3	
3.8.94	100	5.90	52.50	53	5.4		2.9	
3.8.94	126	6.00	52.60	65	5.2		3.6	

Annexe 3.5. transparence et charge totale

fichier	date	Prof (m)	MES(mg/l)	Turb (FTU)	Bscat (%)	Chla (µg/l)
COCH102	10.6.92	10	0.85		0.065	1.19
COCH102	10.6.92	30	0.32		0.059	0.67
COCH102	10.6.92	130	2.50		0.065	0.62
COCH104	10.6.92	10	1.39		0.068	1.23
COCH104	10.6.92	30	0.92		0.065	0.95
COCH104	10.6.92	60	1.50		0.063	0.89
COCH104	10.6.92	85	4.49		0.064	0.89
COCH105	10.6.92	10	0.68		0.062	2.35
COCH105	10.6.92	30	0.57		0.055	2.08
TOSE103	10.6.92	10	0.81		0.072	0.87
TOSE103	10.6.92	30	1.35		0.07	0.66
TOSE103	10.6.92	60	0.50		0.068	0.62
TOSE103	10.6.92	130	0.53		0.071	0.62
COCH201	30.6.92	10	1.23		0.076	2.7
COCH201	30.6.92	30	0.26		0.065	0.8
COCH202	30.6.92	10	1.44		0.077	2.6
COCH202	30.6.92	30	0.66		0.07	0.69
COCH202	30.6.92	60	0.50		0.058	0.58
COCH202	30.6.92	137	0.38		0.062	0.42
COCH204	30.6.92	10	1.30		0.06	2.1
COCH204	30.6.92	30	0.40		0.05	0.49
COCH204	30.6.92	60	0.53		0.05	0.4
COCH204	30.6.92	74	0.51		0.054	0.42
COCH205	30.6.92	10	0.92		0.06	2.35
COCH205	30.6.92	30	0.33		0.05	0.43
TOSE203	30.6.92	10	0.96		0.064	3.15
TOSE203	30.6.92	30	0.80		0.049	0.55
TOSE203	30.6.92	60	0.59		0.048	0.4
TOSE203	30.6.92	126	0.30		0.061	0.39
COCH501	4.8.92	7	0.90	2.2	0.065	3.1
COCH502	4.8.92	7	1.28	2.75	0.068	3.39
COCH503	4.8.92	10	0.92	2.15	0.063	3.65
COCH504	4.8.92	7	0.93	2.5	0.065	2.65
COCH505	4.8.92	7	1.18	2.4	0.066	
TOSE501	4.8.92	7	1.02	2.25	0.067	
TOSE502	4.8.92	7	1.92	2.76	0.064	2.56
TOSE503	4.8.92	7	1.78	3.25	0.0705	5.1
TOSE504	4.8.92	10	1.98	3.4	0.069	
TOSE505	4.8.92	7	1.66	3	0.08	
COCH602	19.8.92	5	1.03	2.52	0.056	3.05
COCH604	18.8.92	5	0.98	2.4	0.06	2.95
COCH603	19.8.92	5	1.08	2.6	0.055	2.9
TOSE602	19.8.92	5	1.23	3	0.055	
COCH604	19.8.92	5	1.62	3.5	0.063	
COCH602	19.8.92	60	0.529	0.08	0.031	0.4
COCH602	19.8.92	135	0.525	0.32	0.037	0.45
COCH702	7.9.92	17	1.18	1.25	0.05	2.22
COCH704	7.9.92	18	1.04	1.1	0.05	2.2
TOSE701	7.9.92	26	-1.91	1.2	0.062	1.44
COCH702	7.9.92	50	0.89	0.18	0.033	0.42
COCH704	7.9.92	50	0.96	0.2	0.033	0.46
COCH704	7.9.92	77	0.90	0.15	0.035	0.4
COCH702	7.9.92	137	0.80	0.42	0.042	0.45
ORTH908	3.10.92	5	1.2	1.45	0.057	2.65
ORTH908	3.10.92	10	1.3	1.42	0.057	2.58
ORTH908	3.10.92	16	1.4	1.25	0.078	3.05
ORTH908	3.10.92	20	1.2	0.83	0.053	1.6
ORTH908	3.10.92	30	0.9	0.4	0.045	0.67
orth908	3.10.92	60	0.8	0.08	0.041	0.41
TOSE1105	5.11.92	19	2.79	9.5	0.25	1.45
TOSE1105	5.11.92	23	1.97	5.45	0.165	1.5
TOSE2103	18.5.93	1	1.05	1	0.048	5
TOSE2103	18.5.93	15	1.75	0.85	0.048	1.83
TOSE2103	18.5.83	100	0.49	0.16	0.036	0.49

Annexe 3.5. transparence et charge totale

fichier	date	Prof (m)	MES(mg/l)	Turb (FTU)	Bscat (%)	Chla (µg/l)
TOSE2103	18.5.93	125	1.05	0.3	0.041	0.52
TOSE2503	15.8.93	5	0.93	0.94	0.08	2.56
TOSE2503	15.6.93	60	0.90	0.04	0.064	0.38
TOSE2503	15.6.93	125	0.60	0.25	0.072	0.38
LAC31025	30.6.93	5.5	2.05	44	0.66	1.8
LAC31026	30.6.93	5	10.00	1.55	0.095	2.18
TOSE3403	15.7.93	5	0.80	1.27	0.089	2.03
TOSE3403	15.7.93	30	0.60	0.26	0.081	0.72
TOSE3403	15.7.93	60	0.27	0.055	0.076	0.38
TOSE3403	15.7.93	100	0.33	0.07	0.075	0.35
TOSE3403	15.7.93	126	0.27	0.25	0.082	0.39
TOSE4803	31.8.93	5	0.97	1.84	0.045	2.67
TOSE4803	31.8.93	30	0.53	0.19	0.032	0.5
TOSE4803	31.8.93	100	0.65	0.02	0.028	0.29
TOSE4803	31.8.93	125	1.00	0.23	0.034	0.39
TOSE5403	10.11.93	5	0.83	0.74	0.061	2.35
TOSE5403	10.11.93	30	0.51	0.35	0.058	0.85
TOSE5403	10.11.93	60	0.30	0.11	0.049	0.36
TOSE5403	10.11.93	100	0.28	0.08	0.045	0.33
TOSE5403	10.11.93	125	0.33	0.27	0.055	0.41
BA_57001	31.1.94	10	0.83	0.53	0.055	0.95
BA_57001	31.1.94	30	0.70	0.55	0.052	0.9
BA_57001	31.1.94	75	0.71	0.58	0.053	0.92
BA_57001	31.1.94	120	0.89	0.59	0.053	0.96
CO_57001	31.1.94	10	1.13	0.84	0.064	1.05
CO_57001	31.1.94	30	1.20	0.87	0.067	1.05
BA_59001	8.3.94	10	0.40	0.38	0.066	2.15
BA_59001	8.3.94	30	0.43	0.31	0.065	1.7
BA_59001	8.3.94	75	0.48	0.32	0.063	1.63
BA_59001	8.3.94	120	0.82	0.79	0.082	1.65
CO_59001	8.3.94	10	1.30	1.75	0.078	4.7
CO_59001	8.3.94	30	0.97	1	0.079	2.7
BA_60001	20.4.94	10	0.75	0.79	0.053	1.94
BA_60001	20.4.94	30	0.87	0.81	0.055	2.05
BA_60001	20.4.94	75	0.73	0.62	0.056	1.35
BA_60001	20.4.94	120	1.17	0.79	0.064	1.15
CO_60001	20.4.94	10	1.30	1.01	0.046	3.05
CO_60001	20.4.94	30	1.00	0.66	0.046	1.6
BA_62001	24.5.94	10	1.30	1.25	0.042	2.25
BA_62001	24.5.94	30	0.71	0.41	0.035	1.13
BA_62001	24.5.94	75	0.64	0.34	0.035	0.59
BA_62001	24.5.94	120	0.90	0.53	0.042	0.46
CO_62001	24.5.94	10	1.10	1.4	0.049	2.2
CO_62001	24.5.94	30	0.80	0.59	0.045	1
BART68001	10.8.94	10	1.50	1.12	0.059	1.46
BART68001	10.8.94	30	0.50	0.15	0.042	0.35
BART68001	10.8.94	75	0.34	0.02	0.04	0.2
BART68001	10.8.94	120	0.57	0.26	0.048	0.2
CORT68001	10.8.94	10	1.60	1.8	0.065	1.41
CORT68001	10.8.94	30	0.55	0.12	0.046	0.34
COCH69005	22.8.94	10	1.65	1.75	0.068	1.55
COCH69005	22.8.94	30	0.68	0.31	0.054	0.58
COCH69009	22.8.94	10	1.85	1.75	0.087	1.6
COCH69009	22.8.94	30	0.58	0.27	0.049	0.52
COCH69009	22.8.94	75	0.50	0.02	0.042	0.19
COCH69009	22.8.94	135	0.56	0.13	0.043	0.19
COCH69012	22.8.94	10	1.60	1.36	0.063	1.42
COCH69012	22.8.94	30	0.82	0.3	0.05	0.65
COCH71005	7.9.94	10	1.70	1.85	0.096	1.27
COCH71005	7.9.94	30	0.90	0.19	0.069	0.32
COCH71009	7.9.94	10	1.95	2.07	0.095	1.19
COCH71009	7.9.94	30	1.03	0.18	0.065	0.3
COCH71009	7.9.94	75	0.50	0.05	0.059	0.21
COCH71009	7.9.94	135	0.55	0.12	0.062	0.22

Annexe 3.5. transparence et charge totale

tichier	dale	Prof (m)	MES(mg/l)	Turb (FTU)	Bscat (%)	Chla (µg/l)
COCH71012	7.9.94	10	1.60	2.45	0.096	1.12
COCH71012	7.9.94	30	0.94	0.32	0.076	0.45
COCH72009	20.9.94	10	1.20	1.16	0.108	1.05
COCH72009	20.9.94	30	0.95	0.36	0.09	0.37
COCH72009	20.9.94	75	0.40	0.07	0.077	0.2
COCH72009	20.9.94	135	0.52	0.28	0.082	0.23
COCH72012	20.9.94	10	1.40	1.54	0.108	1.35
COCH72012	20.9.94	30	1.07	0.4	0.096	0.36
COCH73009	3.10.94	10	1.50	1.28	0.133	1.64
COCH73009	3.10.94	30	0.63	0.3	0.09	0.37
COCH73009	3.10.94	75	0.44	0.07	0.085	0.22
COCH73012	3.10.94	10	1.50	1.21	0.129	1.55
COCH73012	3.10.94	30	0.95	0.41	0.09	0.38
COCH74009	18.10.94	10	1.15	0.92	0.108	1.2
COCH74009	18.10.94	30	0.60	0.22	0.085	0.31
COCH74009	18.10.94	75	0.51	0.12	0.083	0.21
COCH74009	18.10.94	120	0.76	0.4	0.088	0.22
COCH74012	18.10.94	10	1.25	0.98	0.109	1.11
COCH74012	18.10.94	30	0.50	0.13	0.085	0.3
BART75001	7.11.94	10	0.98	0.72	0.1	1.6
BART75001	7.11.94	30	0.71	0.37	0.085	0.65
BART75001	7.11.94	75	0.34	0.12	0.078	0.31
BART75001	7.11.94	120	0.45	0.68	0.098	0.35
CORT75001	7.11.94	10	1.08	0.8	0.102	1.75
CORT75001	7.11.94	30	0.90	0.48	0.097	0.73
CHEV75001	7.11.94	10	1.06	0.73	0.102	1.85
CHEV75001	7.11.94	30	0.90	0.46	0.091	0.58
BART76001	24.11.94	10	0.83	0.77	0.11	1.7
BART76001	24.11.94	30	0.70	0.45	0.102	0.85
BART76001	24.11.94	75	0.28	0.17	0.092	0.27
BART76001	24.11.94	120	0.32	0.25	0.096	0.28
CORT76001	24.11.94	10	0.85	0.85	0.105	1.4
CORT76001	24.11.94	30	0.68	0.44	0.097	0.8
CHEV76001	24.11.94	10	0.83	0.71	0.114	1.55
CHEV76001	24.11.94	30	0.73	0.4	0.102	0.83
CHEV77001	6.12.94	10	0.76	0.52	0.102	1.14
CHEV77001	6.12.94	30	0.52	0.5	0.102	1.12
BART78001	19.12.94	10	0.78	0.61	0.11	1.1
BART78001	19.12.94	30	0.82	0.7	0.112	1
BART78001	19.12.94	75	0.28	0.15	0.091	0.29
BART78001	19.12.94	120	0.66	0.31	0.097	0.27
CORT78001	19.12.94	10	0.80	0.63	0.114	1.1
CORT78001	19.12.94	30	0.86	0.67	0.118	0.8
CHEV78001	19.12.94	10	0.80	0.71	0.115	1.25
CHEV78001	19.12.94	30	0.76	0.59	0.113	0.85
GRIN79007	24.1.95	10	1.02	1.02	0.118	0.63
GRIN79007	24.1.95	75	1.32	1.22	0.12	0.57
GRIN79007	24.1.95	135	1.20	1.3	0.13	0.6
BART80001	31.1.95	10	1.20	1.4	0.135	0.73
BART80001	31.1.95	30	1.32	1.43	0.133	0.63
BART80001	31.1.95	75	1.14	1.4	0.132	0.63
BART80001	31.1.95	120	1.24	1.5	0.133	0.6
CORT80001	31.1.95	10	1.10	1.51	0.132	0.63
CORT80001	31.1.95	30	1.24	1.54	0.135	0.6
CHEV80001	31.1.95	10	1.24	1.33	0.13	0.63
CHEV80001	31.1.95	30	1.27	1.43	0.132	0.6
BART81001	24.3.95	10	0.90	1.12	0.112	1.02
BART81001	24.3.95	30	1.02	1.02	0.117	0.85
BART81001	24.3.95	75	1.08	0.99	0.118	0.75
BART81001	24.3.95	120	1.38	1.05	0.123	0.7
CORT81001	24.3.95	10	1.02	1.28	0.13	1.15
CORT81001	24.3.95	30	0.90	1.03	0.126	0.87

Annexe 4.1. Minéralogie des principaux affluents du lac de Neuchâtel

sédiment total (CPM)	Phyllosilicates	Quartz	Feldspath-K	Plagioclase	Calcite	Dolomite	Ankérite	A+D/A+D+C
mentue 5 avril 92	2160	158100	7680	22740	36300	15300	3240	0.254
mentue 2 juin 92	2930	103282	2700	12629	13937	720	1680	0.103
mentue 17 novembre 92	2423	102260	2182	11779	20061	1704	1404	0.094
seyon 5 avril 92	2580	129300	2040	5520	80460	2100	4560	0.052
seyon 2 juin 92	1860	75043	1380	4358	66558	2100	2820	0.047
seyon 17 novembre 92	1726	60216	900	3044	68388	1320	2470	0.036
areuse 5 avril 92	1680	58200	1260	3420	102840	2640	4560	0.045
areuse 2 juin 92	1300	35308	1020	2494	99998	2580	3300	0.038
areuse 17 novembre 92	1763	43075	1500	1800	79325	8460	10500	0.137
areuse 23 décembre 91	1440	67064	1800	6250	117257	3720	5400	0.049
areuse 23 décembre 91	1500	62931	1260	3300	118587	6840	13020	0.1
areuse 24 décembre 91	1800	70260	2040	5580	108702	2640	10400	0.074
areuse 24 décembre 91	2880	70953	900	1800	124730	7020	5280	0.062
Thielle 5 avril 92	2010	88380	1440	6060	102360	2880	1800	0.03
Thielle 2 juin 92	1400	63137	1620	4644	86628	3240	1320	0.034
Thielle 17 novembre 92	2102	59187	2368	9008	52050	3240	1440	0.057
arnon 5 avril 92	1980	79440	2100	4500	82800	5820	2040	0.06
arnon 17 novembre 92	2161	60134	1969	10026	64043	2280	2580	0.048
broye 17 novembre 92	1648	38104	600	4004	71148	1904	540	0.022
serrière 17 novembre 92	2162	51324	1260	1780	60969	1440	3000	0.046

fraction <2µm (CPS)

	Mentue(N=3)	Areuae(N=2)	Seyon(N=2)	Thielle(N=2)
Chlorite	595	167	305	229
Muscovite	604	191	276	261
Kaolinite	40	60	45	47
Smectite	157	47	85	40

Annexe 4.2. Granulométrie des particules en suspension dans le lac de Neuchâtel

station	Date	prof (m)	0.5-1µm	1-2µm	2-4µm	4-8µm	8-16µm	16-31µm	31-62µm	62-124µm	124-150µm	médiane(µm)	moyenne(µm)
COCH02	10.6.92	10	7.11	10.77	34.12	40.57	7.43	0.00	0.00	0.00	0.00	3.83	4.24
T0SE03	10.6.92	10	6.07	24.84	37.75	18.80	12.54	0.00	0.00	0.00	0.00	5.28	7.38
COCH01	30.6.92	10	3.04	9.86	22.44	33.47	20.98	10.21	0.00	0.00	0.00	4.99	6.86
COCH04	30.6.92	10	4.24	8.66	38.79	48.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.92	3.84
COCH05	30.6.92	10	2.93	6.64	24.24	39.92	26.27	0.00	0.00	0.00	0.00	5.06	5.68
T0SE03	30.6.92	10	2.27	5.79	20.20	47.77	19.45	4.52	0.00	0.00	0.00	5.06	5.84
COCH02	19.8.92	17	2.25	6.37	29.32	42.94	19.12	0.00	0.00	0.00	0.00	4.58	5.13
moyenne			3.99	10.42	29.55	38.83	15.11	2.10	0.00	0.00	0.00	4.67	5.57
COCH01	10.6.92	30	6.78	11.41	36.2	44.12	1.49	0	0	0	0	3.79	3.66
COCH02	10.6.92	30	4.71	14.9	39.61	38.8	1.98	0	0	0	0	3.73	3.67
COCH04	10.6.92	30	9.98	16.16	31.89	37.2	4.77	0	0	0	0	3.66	3.65
T0SE03	10.6.92	30	3.23	7.99	23.35	54.66	10.77	0	0	0	0	4.65	4.91
COCH01	30.6.92	30	5.69	16.21	31.85	34.56	7.22	4.47	0	0	0	3.76	4.60
COCH02	30.6.92	30	8.37	15.51	41.23	34.33	0.56	0	0	0	0	3.33	3.45
COCH04	30.6.92	30	2.99	7.85	30.11	35.43	21.74	1.88	0	0	0	5.04	5.66
COCH05	30.6.92	30	4.02	7.35	34.64	51.33	2.66	0	0	0	0	4.25	4.31
T0SE03	30.6.92	30	2.87	5.79	15.4	49.8	25.02	1.12	0	0	0	6.07	6.37
moyenne			5.40	11.46	31.59	42.25	8.47	0.83	0	0	0	4.25	4.48
COCH02	19.8.92	50	13.75	10.34	25.91	46.23	3.77	0	0	0	0	3.93	3.79
COCH04	10.6.92	60	20.13	33.85	46.02	0	0	0	0	0	0	1.64	1.93
COCH04	30.6.92	60	2.8	11.25	34.68	43.1	8.17	0	0	0	0	3.99	4.42
T0SE03	30.6.92	60	2.96	9.04	39.88	44.72	3.4	0	0	0	0	3.92	4.08
T0SE03	15.6.93	60	30.34	13.62	20.85	31.91	3.28	0	0	0	0	2.57	3.09
moyenne			13.996	15.62	33.47	33.19	3.72	0	0	0	0	3.21	3.46
COCH02	10.6.92	137	8.76	13.98	40.52	32.15	4.59	0	0	0	0	3.64	3.86
T0SE03	10.6.92	126	8.01	14.33	61.75	15.91	0	0	0	0	0	3.49	3.08
COCH02	30.6.92	137	2.74	6.52	25.53	42.37	22.84	0	0	0	0	4.67	5.67
COCH04	30.6.92	74	3.02	9.44	39.27	42.31	5.96	0	0	0	0	3.82	3.82
T0SE03	30.6.92	126	2.89	10.22	36.06	47.8	3.03	0	0	0	0	4.03	4.03
COCH02	19.8.92	137	9.01	12.43	30.54	46.86	1.16	0	0	0	0	3.77	3.82
COCH04	19.8.92	77	4.28	9.78	39.75	37.29	8.9	0	0	0	0	4.16	4.55
T0SE03	15.6.93	125	9.72	12.5	16.65	29.97	28.43	2.73	0	0	0	4.83	6.04
moyenne			6.05	11.15	36.26	36.83	9.36	0.34	0	0	0	4.05	4.36

Annexe 4.3. Minéralogie des particules en suspension dans le lac de Neuchâtel

station	date	prof (m)	micas	chlorite	kaolinite	talc	quartz	feldspath-K	plagioclase	calcite	dolomite	ankérite	apatite
COCH02	10.6.92	10	287	359	31	-	533	46	274	305	101	59	-
COCH02	10.6.92	30	108	111	-	-	126	31	30	-	20	19	-
COCH02	10.6.92	BNL	59	74	-	-	385	-	-	574	-	-	-
COCH04	10.6.92	BNL	132	216	-	-	3605	174	385	1403	136	224	-
TOSE01	30.6.92	10	42	35	-	-	98	-	53	386	31	15	-
TOSE03	30.6.92	10	15	15	-	-	88	-	-	1579	-	-	-
TOSE05	30.6.92	10	81	95	-	-	775	-	115	1030	54	70	-
COCH01	30.6.92	30	83	72	39	31	317	-	41	149	-	-	-
COCH02	30.6.92	30	74	88	63	21	241	-	75	727	-	-	-
COCH04	30.6.92	30	93	76	-	20	137	27	-	-	-	-	-
COCH05	30.6.92	30	89	81	25	-	282	62	39	304	102	53	-
TOSE01	30.6.92	30	104	137	-	-	423	-	71	81	-	-	-
TOSE05	30.6.92	30	83	121	20	-	408	28	42	319	37	35	-
COCH02	30.6.92	60	46	54	-	-	127	35	-	653	-	-	-
COCH04	30.6.92	60	101	75	-	-	144	-	-	264	47	28	-
TOSE03	30.6.92	60	105	130	-	25	1458	65	374	812	167	232	-
COCH02	30.6.92	BNL	82	82	-	28	144	-	30	309	12	26	-
COCH04	30.6.92	BNL	52	58	-	-	111	-	32	645	46	15	-
TOSE03	30.6.92	BNL	147	149	30	22	173	-	53	232	28	40	-
COCH02	19.8.92	60	15	15	-	-	76	-	22	1658	25	-	-
COCH02	19.8.92	BNL	15	15	-	-	89	-	20	1888	32	-	-
COCH02	7.9.92	17	38	37	-	-	143	-	-	1533	48	96	-
COCH04	7.9.92	18	31	31	-	-	230	-	22	1296	-	-	-
TOSE01	7.9.92	26	37	46	-	-	300	-	20	2881	-	-	-
COCH02	7.9.92	50	52	44	-	-	134	-	21	1226	-	-	-
COCH04	7.9.92	50	20	25	-	-	114	-	66	1638	-	-	-
COCH02	7.9.92	BNL	48	52	-	-	80	-	30	1325	-	-	-
COCH04	7.9.92	BNL	34	39	-	33	109	-	46	1151	-	-	115
TOSE05	5.11.92	19	76	82	20	-	574	15	38	2605	35	28	-
TOSE05	5.11.92	23	66	86	-	-	629	20	45	2493	120	145	-
COCH02	10.12.92	90	68	75	-	-	440	-	35	1327	20	20	-

Annexe 4.4. Granulométrie du matériel récolté par pièges à sédiments

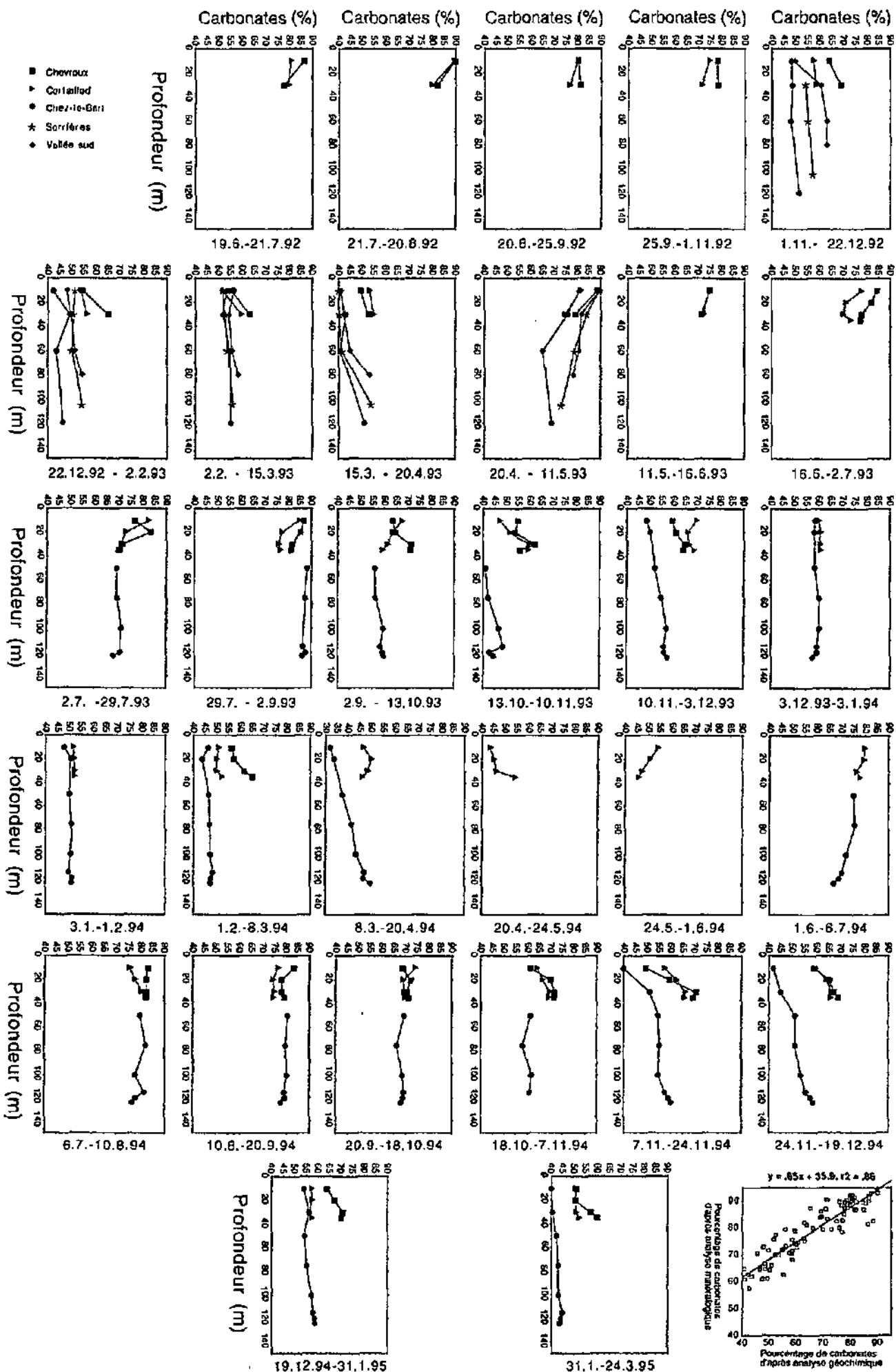
station	date	prof (cm)	0-5 µm	1-2 µm	2-4 µm	4-8 µm	8-16 µm	16-31 µm	31-62 µm	62-124 µm	124-150 µm	médiane(µm)	moment(µm)	Confiance (%)
corail Nord	22.12.93	10	2.01	5.68	20.50	33.36	14.88	15.62	8.95	0	0	5.80	11.50	99.93
chez-le-Bart	22.12.93	10	2.26	8.10	23.40	36.94	16.93	10.49	3.58	0	0	5.14	8.39	99.95
corail Nord	15.3.93	10	1.27	4.06	19.15	34.63	17.38	10.56	2.85	0	0	5.97	9.90	99.95
chez-le-Bart	15.3.93	10	2.80	6.96	23.58	35.45	15.47	15.20	1.53	0	0	5.14	8.23	99.99
vallée sud	22.12.92	30	1.83	5.24	22.5	34.03	17.01	15.24	3.60	0	0	5.43	9.54	99.98
corail Nord	22.12.92	30	2.42	6.18	21.82	34.08	17.47	15.26	4.97	0	0	5.45	9.45	99.87
vallée sud	22.12.92	30	2.96	8.19	21.83	40.75	15.52	4.75	0	0	0	4.56	5.85	100
chez-le-Bart	22.12.92	30	2.99	8.48	29.1	45.04	10.75	4.75	0	0	0	4.2	5.34	100
corail Nord	15.3.93	30	2.27	5.75	19.01	31.30	14.2	10.76	10.33	0	0	6.06	11.43	99.54
chez-le-Bart	15.3.93	30	1.10	2.95	12.42	30.56	26.25	25.01	1.7	0	0	8.89	11.28	99.98
chez-le-Bart	15.3.93	30	2.25	6.38	23.075	35.18	16.85	13.33	2.65	0	0	5.19	8.39	100
vallée sud	15.3.93	30	2.27	7.15	21.34	34.73	16.72	11.49	4.5	0	0	5.11	8.30	99.98
chez-le-Bart	20.4.93	30	1.68	4.51	10.33	33.38	24.11	16.98	0	0	0	6.74	9.64	99.85
vallée sud	22.12.92	60	2.06	6.2	21.38	33.91	15.19	14.43	6.83	0	0	5.61	9.85	99.99
vallée sud	15.3.93	60	2.37	6.63	22.24	34.64	16.30	13.53	3.6	0	0	5.29	8.98	99.99
chez-le-Bart	22.12.92	120	2.29	6.28	21.26	37.53	16.14	8.16	1.47	0	0	4.57	6.73	100
vallée sud	22.12.92	120	2.56	7.28	21.67	40.30	14.72	5.33	0.35	0	0	4.66	6.77	100
chez-le-Bart	15.3.93	120	2.47	8.47	27.77	37.52	15.91	10.69	1.75	0	0	4.55	6.59	100
vallée sud	15.3.93	120	2.02	7.04	23.41	36.73	15.91	16.62	0	0	0	4.88	7.25	100
corail Nord	15.3.93	10	1.23	3.71	19.24	44.61	21.27	7.93	0	0	0	5.37	7.31	100
chez-le-Bart	15.3.93	10	0.68	2.46	14.99	35.75	23.71	16.22	6.81	0	0	5.37	7.31	100
corail Nord	15.3.93	10	0.70	2.31	13.97	44.01	31.36	7.65	0	0	0	6.15	8.03	99.95
chez-le-Bart	15.3.93	10	0.56	1.8	12.11	32.71	23.28	13.56	6.02	0	0	5.66	7.28	99.88
vallée sud	15.3.93	10	1.53	3.9	22.37	34.26	12.25	19.61	6.35	0	0	5.66	7.34	99.89
corail Nord	15.3.93	10	2.11	3.78	19.57	32.25	19.61	12.67	0	0	0	5.48	7.7	100
chez-le-Bart	20.7.93	10	1.35	3.78	18.79	33.66	16.86	12.4	4.73	0	0	6.12	10.44	99.85
corail Nord	20.7.93	10	2.45	5.32	22.23	33.95	17.43	12.4	3.21	0	0	5.04	8.07	99.96
chez-le-Bart	11.5.93	30	1.53	3.4	17.55	39.16	26.95	19.33	0.31	0	0	5.99	7.98	100
corail Nord	11.5.93	30	0.87	2.39	13.52	31.43	19.33	12.4	0	0	0	7.01	9	99.78
vallée sud	11.5.93	30	0.57	1.64	10.21	34.44	26.14	22.6	4.41	0	0	8.61	11.98	99.77
chez-le-Bart	15.6.93	30	0.43	2.76	17.78	29.75	26.82	14.21	0	0	0	9.61	14.64	99.69
corail Nord	15.6.93	30	0.56	4.88	21.42	36.3	15.39	13.24	0	0	0	5.37	9.15	99.99
chez-le-Bart	20.7.93	30	0.91	3.43	21.06	38.12	18.35	15.63	0.4	0	0	8.84	8.45	99.95
chez-le-Bart	20.7.93	30	0.90	2.46	14.27	35.53	18.77	21.34	5.13	0	0	6.99	11.63	99.97
corail Nord	20.7.93	30	2.15	3.75	22.10	37.95	16.86	14.21	2.98	0	0	5.45	8.67	99.84
vallée sud	11.5.93	60	0.42	1.57	8.84	28.43	26.84	21.64	4.46	0	0	10.64	13	99.83
chez-le-Bart	20.7.93	60	0.87	2.89	14.33	35.63	18.75	21.49	6.03	0	0	7.02	11.86	99.39
chez-le-Bart	20.7.93	100	0.89	2.98	16.84	37.53	18.93	19.01	3.98	0	0	6.53	9.9	99.49
chez-le-Bart	11.5.93	120	0.88	2.62	14.08	37.87	28.54	18.73	0.28	0	0	6.98	9.38	99.93
vallée sud	11.5.93	120	1.88	4.36	21.03	44.91	19.37	8.55	0	0	0	5.42	7.10	100
chez-le-Bart	20.7.93	120	1.47	3.65	20.06	42.86	19.43	10.2	1.43	0	0	5.46	7.8	99.99
station	date	prof (cm)	0-5 µm	1-2 µm	2-4 µm	4-8 µm	8-16 µm	16-31 µm	31-62 µm	62-124 µm	124-150 µm	médiane(µm)	moment(µm)	
biyer	biyevine	10	2.16	5.77	21.11	34.99	16.88	13.71	3.59	0.00	0.00	5.36	9.24	
biyer	biyevine	30	2.29	6.20	21.65	35.40	17.71	13.68	3.05	0.00	0.00	5.74	8.81	
biyer	biyevine	60	2.17	6.32	22.06	35.45	15.89	13.93	5.22	0.00	0.00	5.45	9.42	
biyer	biyevine	100	2.84	8.64	22.03	38.04	14.95	8.22	0.89	0.00	0.00	4.66	6.84	
616	biyevine	10	1.33	3.38	17.08	37.90	21.67	14.34	3.39	0.00	0.00	6.30	9.24	
616	biyevine	30	1.24	3.05	16.99	36.70	22.69	15.43	3.91	0.00	0.00	6.91	10.19	
616	biyevine	60	0.73	2.41	13.34	33.80	22.72	22.72	4.82	0.00	0.00	8.06	11.49	
616	biyevine	100	1.41	3.51	18.69	41.88	22.43	11.49	0.57	0.00	0.00	5.95	8.11	
biyer	biyevine	-	2.36	6.61	22.96	33.68	16.36	12.90	3.13	0.00	0.00	5.35	8.58	
616	biyevine	-	1.18	3.09	16.75	37.57	22.25	16.00	3.17	0.00	0.00	6.81	9.23	
616	biyevine	11.5.93	0.93	2.60	14.49	38.32	26.29	15.14	2.23	0.00	0.00	7.30	9.25	
616	biyevine	1.47	3.61	19.24	36.72	18.82	15.14	4.36	0.00	0.00	0.00	6.23	9.89	
biyevine	biyevine	-	1.77	4.04	19.68	37.00	20.25	13.80	2.55	0.00	0.00	6.10	8.94	
biyevine	biyevine	-	1.63	4.23	19.45	35.78	19.43	14.67	4.30	0.00	0.00	6.20	9.76	

Annexe 4.5. Estimation de la vitesse moyenne de chute des particules

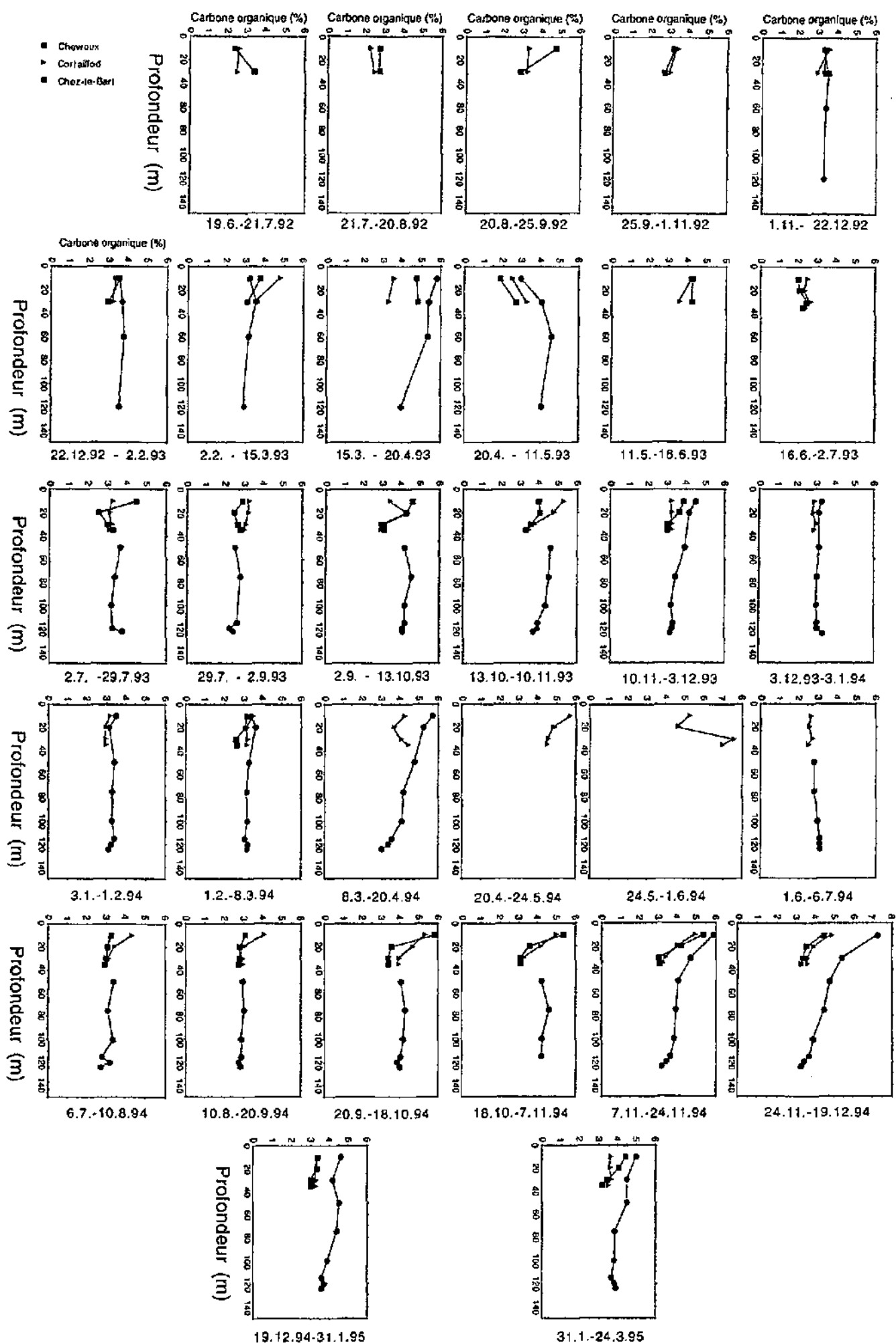
Période	Charge (mg/l)	Flux total (g/m2*j)	Vt [m/j]	Vp,t [m/j]
Mai-Juin92, 10m tombants	0.93	2.79	3.00	3.00
Mai-Juin92, 30m tombants	0.79	3.22	4.08	3.74
Juin-Juillet92, 10m tombants	1.06	8.70	8.21	8.21
Juin-Juillet92, 30m tombants	0.45	8.98	19.96	11.89
Juillet-Août92, 10m tombants	1.28	7.16	5.59	5.59
Août-Septembre92, 10m tombants	1.32	6.53	4.95	4.95
Août-Septembre92, 30m tombants	1.11	5.95	5.36	4.90
Septembre-Octobre92, 10m tombants	1.17	3.37	2.88	2.88
Septembre-Octobre92, 30m tombants	1.10	10.67	9.70	9.40
Avril-Mai93, 10m plaine	1.05	3.57	3.40	3.40
Avril-Mai93, 30m plaine	1.05	3.92	3.73	3.73
Avril-Mai93, 60m plaine	0.49	3.35	6.84	4.35
Avril-Mai93, 120m plaine	1.05	3.65	3.47	5.37
Juin93, 10m plaine	1.19	2.69	2.26	2.26
Juin93, 30m plaine	0.73	2.69	3.68	2.80
Juin93, 60m plaine	0.59	2.69	4.56	3.47
Juin93, 100m plaine	0.47	2.90	6.17	4.08
Juin93, 120m plaine	0.45	2.97	6.60	4.18
Août93, 10m plaine	0.79	3.30	4.18	4.18
Août93, 30m plaine	0.56	3.30	5.89	4.85
Août93, 60m plaine	0.44	3.30	7.50	5.89
Août93, 100m plaine	0.49	3.30	6.73	6.35
Août93, 120m plaine	0.64	3.30	5.16	6.23
Septembre93, 10m plaine	0.92	3.30	3.59	3.59
Septembre93, 30m plaine	0.52	3.30	6.35	4.58
Septembre93, 60m plaine	0.49	3.30	6.73	5.41
Septembre93, 100m plaine	0.48	3.30	6.88	6.00
Septembre93, 120m plaine	0.86	3.30	3.84	5.69
Octobre93, 10m plaine	0.88	2.47	2.81	2.81
Octobre93, 30m plaine	0.52	2.16	4.15	3.09
Octobre93, 60m plaine	0.40	2.16	5.40	3.93
Octobre93, 100m plaine	0.39	4.18	10.72	8.89
Octobre93, 120m plaine	0.71	5.64	7.94	11.51
Janvier94, 10m tombants	1.13	10.75	9.51	9.51
Janvier94, 10m plaine	0.83	3.71	4.47	4.47
Janvier94, 30m tombants	1.20	12.48	10.40	10.67
Janvier94, 30m plaine	0.70	4.15	5.93	5.39
Janvier94, 75m plaine	0.71	4.98	7.01	6.73
Janvier94, 120m plaine	0.89	5.18	5.82	7.10
Février94, 10m tombants	1.22	1.86	1.53	1.53
Février94, 10m plaine	0.72	2.22	3.10	3.10
Février94, 30m tombants	1.09	3.40	3.13	3.01
Février94, 30m plaine	0.57	2.25	3.98	3.57
Février94, 75m plaine	0.60	2.52	4.24	4.13
Février94, 100m plaine	0.65	2.86	4.40	4.61
Février94, 120m plaine	0.86	4.05	4.74	6.23
Mars-Avril94, 10m tombants	1.30	2.44	1.88	1.88
Mars-Avril94, 10m plaine	0.58	1.51	2.63	2.63
Mars-Avril94, 30m tombants	0.99	3.76	3.82	3.27
Mars-Avril94, 30m plaine	0.65	1.39	2.14	2.24
Mars-Avril94, 75m plaine	0.62	1.43	2.31	2.31
Mars-Avril94, 120m plaine	1.00	3.56	3.56	5.48
Avril-Mai94, 10m tombants	1.20	2.44	2.03	2.03
Avril-Mai94, 30m tombants	0.90	5.31	5.90	5.06
Juin94, 10m tombants	1.10	4.84	4.40	4.40
Juin94, 10m plaine	1.30	4.80	3.69	3.69
Juin94, 30m tombants	0.80	4.30	5.38	4.53
Juin94, 30m plaine	0.71	4.80	6.76	4.80
Juin94, 75m plaine	0.64	5.56	8.69	6.78

Annexe 4.5. Estimation de la vitesse moyenne de chute des particules

Période	Charge (mg/l)	Flux total (g/m ² *j)	Vl [m/j]	Vp,t [m/j]
Juin94, 120m plaine	0.90	6.43	7.14	8.57
Juillet-Août94, 10m tombants	1.60	5.15	3.22	3.22
Juillet-Août94, 10m plaine	1.50	1.70	1.13	1.13
Juillet-Août94, 30m tombants	0.55	1.71	3.11	1.58
Juillet-Août94, 30m plaine	0.50	1.70	3.40	1.70
Juillet-Août94, 75m plaine	0.34	3.11	9.15	4.64
Juillet-Août94, 120m plaine	0.57	3.02	5.30	5.39
Août-Septembre94, 10m tombants	1.55	6.63	4.28	4.28
Août-Septembre94, 10m plaine	1.58	2.85	1.81	1.81
Août-Septembre94, 30m tombants	0.85	4.15	4.91	3.46
Août-Septembre94, 30m plaine	0.77	2.85	3.73	2.75
Août-Septembre94, 75m plaine	0.43	3.15	7.41	4.32
Août-Septembre94, 120m plaine	0.55	3.15	5.72	5.16
Septembre-Octobre94, 10m tombants	1.38	2.24	1.62	1.62
Septembre-Octobre94, 10m plaine	1.28	2.30	1.79	1.79
Septembre-Octobre94, 30m tombants	0.84	2.04	2.43	1.84
Septembre-Octobre94, 30m plaine	0.73	2.30	3.17	1.14
Septembre-Octobre94, 75m plaine	0.45	2.30	5.11	3.16
Septembre-Octobre94, 120m plaine	0.64	2.30	3.59	3.29
Octobre-Novembre94, 10m tombants	1.16	1.43	1.23	1.23
Octobre-Novembre94, 10m plaine	1.07	1.17	1.10	1.10
Octobre-Novembre94, 30m tombants	0.70	7.67	10.95	8.24
Octobre-Novembre94, 30m plaine	0.66	1.17	1.79	0.68
Octobre-Novembre94, 75m plaine	0.43	1.20	2.82	1.87
Octobre-Novembre94, 120m plaine	0.61	1.24	2.05	1.97
Novembre94, 10m tombants	0.96	1.28	1.34	1.34
Novembre94, 10m plaine	0.91	0.77	0.85	0.85
Novembre94, 30m tombants	0.80	4.91	6.12	5.59
Novembre94, 30m plaine	0.71	0.80	1.13	0.99
Novembre94, 75m plaine	0.31	0.98	3.16	1.76
Novembre94, 120m plaine	0.39	1.60	4.16	3.20
Novembre-Décembre94, 10m tombants	0.80	1.47	1.83	1.83
Novembre-Décembre94, 10m plaine	0.81	0.51	0.63	0.63
Novembre-Décembre94, 30m tombants	0.68	3.13	4.61	4.23
Novembre-Décembre94, 30m plaine	0.76	0.53	0.70	0.68
Novembre-Décembre94, 75m plaine	0.28	1.56	5.57	2.94
Novembre-Décembre94, 120m plaine	0.49	3.89	7.94	7.52
Janvier95, 10m tombants	0.98	7.80	7.95	7.95
Janvier95, 10m plaine	1.00	4.18	4.18	4.18
Janvier95, 30m tombants	1.03	14.90	14.43	14.81
Janvier95, 30m plaine	1.07	5.59	5.22	5.40
Janvier95, 75m plaine	0.91	5.29	5.79	5.43
Janvier95, 120m plaine	1.03	11.65	11.27	11.72
Mars95, 10m tombants	1.09	4.96	4.55	4.55
Mars95, 10m plaine	1.05	2.61	2.49	2.49
Mars95, 30m tombants	1.08	7.11	6.60	6.56
Mars95, 30m plaine	1.17	3.29	2.81	2.96
Mars95, 75m plaine	1.11	4.30	3.87	3.87
Mars95, 120m plaine	1.31	5.83	4.45	4.95



Annexe 4.6. Teneurs en carbonates pour chaque période d'exposition des pièges



Annexe 4.7. Teneurs en carbone organique pour chaque période d'exposition des pièges

Annexe 4.8. Flux et composition du matériel récolté dans les pièges

Station	explanilla	prof(m)	pH (p)	Cin (‰)	Non (‰)	Net (‰)	Carg (‰)	Cin (‰) (Cin-Carg)	Carbonates (Cin + S.33) (‰)	Résidu insoluble (Rin-Cin) (‰)	Flux total (g/m ² /j)	Flux carbonaté (g/m ² /j)	Flux de matière organique (Corg * 2) (g/m ² /j)	Flux de résidu insoluble (g/m ² /j)	Flux d'azote (g/m ² /j)	C/N (Corg/Net)
19.5-19.6.92																
toléromes	to1	10		13.81	0.95	0.99	6.23	7.57	63.13	24.39	2.98	1.88	0.17	0.73	0.026	0.6
toléromes	to2	30		13.42	0.89	1.19	6.22	7.20	60.05	27.51	5.22	3.13	0.65	1.44	0.046	7.0
chevrons	ch1	10		13.72	0.77	1.05	5.47	8.25	68.81	20.26	1.15	2.17	0.34	0.64	0.034	7.1
chevrons	ch2	30		13.16	0.84	1.16	6.15	7.01	58.46	29.24	3.61	2.11	0.44	1.06	0.031	7.1
chez-le-han	chl1	10		13.73	0.80	1.05	5.80	7.94	66.22	22.18	2.69	1.78	0.31	0.60	0.022	7.1
chez-le-han	chl2	30		11.80	0.75	1.00	6.32	5.48	45.70	41.66	5.02	1.38	0.48	1.26	0.023	8.4
corailled	co1	10		13.34	0.79	1.12	6.22	7.12	59.38	28.18	2.35	1.40	0.29	0.66	0.019	7.9
corailled	co2	30		12.21	0.78	1.14	5.94	6.27	57.29	35.61	3.02	1.58	0.36	1.08	0.024	7.6
19.6-21.7.92																
toléromes	to1	10		12.91	0.79	1.50	2.51	10.40	86.34	8.24	8.60	1.46	0.43	0.71	0.028	8.1
toléromes	to2	30		12.64	0.37	0.60	3.18	9.46	78.90	14.74	9.90	1.81	0.63	1.46	0.037	8.6
chevrons	ch1	10		12.75	0.29	0.45	2.37	10.38	86.57	8.69	7.80	0.75	0.37	0.68	0.023	8.2
chevrons	ch2	30		12.69	0.38	0.61	3.36	9.33	77.81	15.47	8.01	0.22	0.54	1.34	0.030	8.8
chez-le-han	chl1	10		12.14	0.28	0.48	2.52	9.62	80.23	14.23	10.00	8.34	0.52	1.53	0.029	9.0
chez-le-han	chl2	30		11.79	0.30	0.50	2.46	9.33	77.81	17.27	10.30	8.01	0.51	1.78	0.031	8.2
corailled	co1	10		12.18	0.30	0.51	2.51	9.67	80.65	14.33	8.01	6.45	0.40	1.15	0.024	8.4
corailled	co2	30		12.02	0.33	0.55	2.47	9.55	79.65	15.41	7.70	6.11	0.38	1.19	0.025	7.5
21.7-21.8.92																
toléromes	to1	10		12.99	0.31	0.46	2.46	10.53	87.82	7.26	12.70	11.15	0.65	0.92	0.019	7.9
toléromes	to2	30		12.35	0.33	0.53	2.73	9.62	80.23	14.31	10.20	8.18	0.56	1.46	0.034	8.3
chevrons	ch1	10		13.50	0.38	0.53	2.72	10.78	89.91	4.65	2.94	2.64	0.16	0.14	0.031	7.3
chevrons	ch2	30		12.55	0.32	0.54	2.72	9.83	81.98	12.58	7.46	6.12	0.43	0.94	0.024	8.5
chez-le-han	chl1	10		12.77	0.25	0.42	2.28	10.49	87.49	7.95	7.42	6.49	0.34	0.59	0.019	9.1
chez-le-han	chl2	30		11.83	0.29	0.49	2.60	9.23	76.98	17.82	10.55	8.12	0.45	1.66	0.031	9.0
corailled	co1	10		12.96	0.26	0.40	2.21	10.75	89.66	5.93	9.30	8.34	0.41	0.55	0.024	8.5
corailled	co2	30		11.99	0.28	0.48	2.42	9.57	79.81	15.35	7.75	6.17	0.37	1.19	0.022	8.6
20.8-25.1.92																
toléromes	to1	10		13.76	0.66	0.81	4.41	9.33	77.81	11.33	10.10	7.86	0.80	1.34	0.067	6.7
toléromes	to2	30		12.43	0.33	0.53	2.92	9.51	79.31	14.85	15.40	12.21	0.91	2.29	0.051	8.6
chevrons	ch1	10		14.37	0.71	0.64	4.71	9.66	80.56	10.02	6.20	4.99	0.58	0.62	0.044	6.6
chevrons	ch2	30		12.62	0.37	0.58	2.87	9.75	81.32	12.95	10.40	8.46	0.60	1.35	0.038	7.8
chez-le-han	chl1	10		13.01	0.43	0.61	3.74	9.77	81.49	12.04	8.01	3.91	0.31	0.58	0.023	6.8
chez-le-han	chl2	30		11.85	0.35	0.54	2.74	9.11	75.98	18.54	8.40	4.66	0.35	1.19	0.023	7.8
corailled	co1	10		12.86	0.44	0.60	3.24	9.67	80.23	13.29	5.01	4.01	0.32	0.66	0.022	7.4
corailled	co2	30		12.39	0.39	0.61	3.18	9.21	76.81	16.83	5.90	4.22	0.35	0.93	0.021	8.2
25.9-30.1.92																
toléromes	to1	10		12.51	0.43	0.64	3.22	9.29	77.48	16.08	3.50	2.71	0.23	0.56	0.015	7.5
toléromes	to2	30		12.12	0.35	0.55	2.82	9.10	77.56	16.80	11.60	9.80	0.65	1.95	0.041	8.1
corailled	co1	10		12.28	0.45	0.65	3.32	8.96	74.73	18.63	5.60	4.18	0.17	1.24	0.025	7.4
corailled	co2	30		11.56	0.33	0.57	2.99	8.57	71.47	22.55	12.50	8.93	0.73	2.82	0.044	8.5
chevrons	ch1	10		12.60	0.44	0.62	3.29	9.40	78.40	15.02	1.80	1.18	0.10	0.23	0.017	7.5
chevrons	ch2	30		12.16	0.38	0.51	2.74	9.42	78.56	15.96	29.30	23.02	1.61	4.68	0.111	7.2
chez-le-han	chl1	10		12.16	0.48	0.65	3.51	8.65	72.14	20.64	2.90	2.09	0.20	0.60	0.014	7.3
chez-le-han	chl2	30		11.34	0.36	0.55	2.68	8.66	72.22	22.32	7.90	5.71	0.42	1.77	0.028	7.4
30.11-22.12.92																
serrières	se1	30		10.36	0.41	0.67	3.84	6.52	54.38	37.94	3.70	1.47	0.21	1.02	0.012	8.9
serrières	se2	60		9.58	0.34	0.73	3.92	6.64	55.38	38.78	4.10	2.27	0.24	1.59	0.014	8.6
serrières	se3	105		9.87	0.33	0.73	3.90	6.68	57.38	36.64	5.60	3.21	0.33	2.05	0.018	9.1
chevrons	ch1	10		11.14	0.40	0.72	3.37	7.67	63.97	29.29	3.30	2.69	0.38	1.23	0.017	8.4
chevrons	ch2	30		11.30	0.38	0.63	3.30	8.29	69.14	24.26	17.23	11.89	1.14	4.17	0.065	8.7
valle sud	vs1	10		9.78	0.43	0.89	3.82	5.96	49.71	42.65	2.50	1.34	0.18	0.98	0.010	8.9
valle sud	vs2	30		10.04	0.36	0.78	2.78	2.26	60.55	17.89	3.40	2.05	0.19	1.15	0.012	7.7
valle sud	vs3	60		10.50	0.32	0.68	2.93	7.57	61.13	31.01	8.00	5.05	0.47	2.48	0.026	9.2
valle sud	vs4	80		10.69	0.35	0.73	3.16	7.53	62.80	30.88	10.00	6.28	0.64	3.09	0.035	9.0
corailled	co1	10		10.39	0.42	0.77	3.48	6.91	57.63	35.41	4.60	2.63	0.32	1.61	0.019	8.3
corailled	co2	30		9.92	0.29	0.65	2.90	7.02	58.55	35.65	8.10	4.74	0.47	2.89	0.023	10.0
chez-le-han	chl1	10		9.10	0.44	0.87	3.29	5.81	48.46	44.86	2.10	1.02	0.14	0.94	0.009	7.5
chez-le-han	chl2	30		9.30	0.39	0.80	3.48	5.82	48.54	44.80	3.00	1.46	0.21	1.34	0.012	8.9
chez-le-han	chl3	60		9.12	0.34	0.85	3.33	5.77	46.12	45.18	4.50	2.17	0.29	2.01	0.015	9.0
chez-le-han	chl4	120		9.45	0.23	0.56	3.25	6.20	50.71	41.79	8.00	4.14	0.52	3.34	0.016	14.1
22.12-22.2.93																
serrières	se1	10		9.51	0.40	0.80	3.32	6.19	51.62	41.74	3.00	1.55	0.30	1.25	0.012	8.3
serrières	se2	30		9.46	0.35	0.80	3.36	6.10	50.87	42.41	3.40	1.73	0.23	1.44	0.012	9.6
serrières	se3	60		9.27	0.35	0.80	3.22	6.05	50.46	43.00	3.90	1.97	0.25	1.68	0.014	9.2
serrières	se4	105		9.73	0.34	0.73	3.19	6.54	52.54	39.08	11.00	6.00	0.70	4.30	0.027	9.4
chevrons	ch1	10		10.15	0.43	0.88	3.58	6.57	54.79	38.03	1.50	0.82	0.11	0.57	0.006	8.2
chevrons	ch2	30		10.84	0.37	0.71	3.01	7.83	65.30	36.68	5.00	3.27	0.30	1.43	0.019	8.1
valle sud	vs1	10		9.22	0.38	0.87	3.66	5.76	48.04	45.04	2.10	1.01	0.15	0.95	0.008	9.1
valle sud	vs2	30		9.32	0.40	0.87	3.56	5.96	49.71	43.57	2.70	1.34	0.18	1.18	0.011	8.4
valle sud	vs3	60		9.70	0.40	0.87	3.52	6.18	51.54	41.02	3.60	1.86	0.25	1.47	0.014	8.8
valle sud	vs4	80		9.79	0.37	0.88	3.27	6.32	54.38	39.08	5.60	3.03	0.37	2.19	0.021	8.8
corailled	co1	10		9.84	0.35	0.78	3.37	6.47	53.86	39.30	3.80	2.05	0.26	1.49	0.013	9.6
corailled	co2	30		9.95	0.34	0.71	3.19	6.76	55.38	37.54	6.20	3.50	0.40	2.31	0.021	9.4
chez-le-han	chl1	10		8.64	0.40	0.94	3.54	3.10	42.53	50.39	2.60	1.11	0.18	1.21		

Station	coléonite	prof (m)	phs (g)	Clot (%)	Ntot (%)	Ntot (%)	Corp (%)	Carb (C)	Chébonnes	Rédu	Flux tot	Flux	Flux	Flux	Flux	Flux	C/N
								(C/N-Corp)	(C/N + R, 13)	(C/N)	(g/m ²)	(g/m ²)	(g/m ²)	(g/m ²)	(g/m ²)	(g/m ²)	
collée sud	vs3	60		10.77	0.77	1.41	5.36	5.41	43.42	44.36	0.66	0.20	0.07	0.29	0.078	7.0	
collée sud	vs4	80		10.60	0.72	1.25	4.23	6.37	33.13	38.41	1.58	0.84	0.13	0.61	0.011	5.9	
corailled	co1	10		9.92	0.47	1.02	3.51	6.41	53.46	30.52	7.20	1.18	0.15	0.87	0.010	7.5	
corailled	co2	30		9.84	0.49	1.02	3.56	6.58	54.88	30.60	3.55	1.95	0.23	1.37	0.017	6.7	
chez-le-han	ch1	10		10.70	0.99	1.71	5.80	4.90	40.87	47.53	0.65	0.27	0.08	0.31	0.009	5.9	
chez-le-han	ch2	30		10.56	0.86	1.60	5.40	5.16	43.03	46.17	1.52	0.25	0.08	0.20	0.005	6.3	
chez-le-han	ch3	60		10.23	0.78	1.32	5.32	4.91	40.95	48.41	1.50	0.20	0.05	0.21	0.004	6.8	
chez-le-han	ch4	120		10.11	0.55	1.03	3.95	6.16	51.37	40.73	3.22	1.65	0.23	1.11	0.018	7.2	
20.4.-11.5.93																	
serrières	se1	30		12.60	0.25	0.46	1.84	10.76	89.74	6.58	4.37	3.92	0.16	0.29	0.011	7.4	
serrières	se2	30		12.47	0.26	0.49	2.36	10.11	84.32	10.96	4.38	3.69	0.21	0.48	0.011	9.1	
serrières	se3	60		12.63	0.43	0.74	3.77	9.85	78.90	14.76	2.98	2.35	0.19	0.44	0.012	7.9	
serrières	se4	105		12.41	0.52	0.81	3.58	8.83	73.64	19.20	4.71	2.97	0.29	0.77	0.014	6.9	
chemours	ch1	10		12.49	0.24	0.45	1.82	10.67	88.99	7.17	3.90	3.47	0.14	0.29	0.009	7.6	
chemours	ch2	30		12.20	0.12	0.66	2.69	9.50	79.21	15.31	4.23	3.35	0.23	0.63	0.014	8.4	
collée sud	vs3	10		13.11	0.46	0.59	2.15	10.96	91.43	4.29	4.48	4.05	0.19	0.19	0.016	6.0	
collée sud	vs2	30		12.61	0.36	0.66	2.80	9.81	81.82	12.58	5.12	4.19	0.29	0.64	0.018	7.8	
collée sud	vs4	70		12.42	0.46	0.67	2.70	9.72	81.06	13.54	4.74	3.84	0.26	0.64	0.017	7.5	
collée sud	vs4	80		12.50	0.42	0.74	3.10	9.40	78.40	15.40	4.76	3.73	0.30	0.73	0.020	7.3	
corailled	co1	10		12.27	0.29	0.61	2.49	9.78	80.59	13.45	2.78	2.27	0.14	0.39	0.008	8.6	
corailled	co2	30		12.21	0.19	0.77	3.24	8.97	74.81	18.71	3.23	2.43	0.21	0.61	0.013	8.3	
chez-le-han	ch1	30		12.70	0.36	0.71	2.97	9.73	81.15	12.91	2.36	1.92	0.14	0.30	0.008	8.3	
chez-le-han	ch2	30		13.17	0.58	0.94	4.08	9.09	75.81	16.03	2.63	4.39	0.21	0.42	0.015	7.0	
chez-le-han	ch3	60		12.41	0.65	1.08	4.58	7.83	65.30	23.54	2.33	1.52	0.21	0.40	0.015	7.0	
chez-le-han	ch4	120		12.34	0.57	0.98	4.02	8.32	69.39	23.57	2.13	1.49	0.17	0.49	0.012	7.1	
11.5.-16.6.93																	
chemours	ch1	10		13.24	0.54	0.94	4.23	9.01	75.14	16.40	2.48	1.86	0.21	0.43	0.013	8.3	
chemours	ch2	30		12.79	0.52	0.89	4.23	8.50	71.39	20.15	3.43	2.43	0.29	0.69	0.018	8.1	
corailled	co1	10		13.16	0.54	0.94	4.30	8.96	74.73	16.87	1.80	1.78	0.12	0.52	0.008	7.8	
corailled	co2	30		13.18	0.42	0.83	3.51	8.67	72.31	20.07	2.43	1.76	0.17	0.50	0.010	8.4	
16.6.-2.7.93																	
chemours	ch1	10		12.11	0.21	0.49	1.97	10.14	81.57	11.49	5.54	4.68	0.22	0.64	0.012	9.4	
chemours	ch2	20		11.90	0.25	0.50	2.06	9.84	82.07	11.81	9.92	8.14	0.41	1.37	0.025	8.2	
chemours	ch3	30		11.82	0.28	0.55	2.50	9.32	77.73	17.27	10.24	7.95	0.51	1.77	0.029	8.9	
chemours	ch4	35		11.49	0.26	0.51	2.23	9.25	77.15	18.38	14.88	11.48	0.67	2.73	0.039	8.6	
corailled	co1	10		11.74	0.26	0.52	2.43	9.31	77.65	17.49	8.43	6.55	0.41	1.47	0.022	9.3	
corailled	co2	20		10.84	0.23	0.54	2.29	8.55	71.31	24.11	14.24	10.15	0.65	3.43	0.036	9.2	
corailled	co3	30		10.95	0.28	0.58	2.57	8.38	69.89	24.97	7.68	5.21	0.38	1.86	0.021	9.2	
corailled	co4	35		10.83	0.23	0.56	2.28	8.75	72.98	22.47	10.54	7.69	0.48	2.37	0.026	9.1	
2.7.-2.9.93																	
chemours	ch1	10		13.69	0.58	0.91	4.47	9.21	76.89	14.17	6.74	5.18	0.64	0.95	0.039	7.7	
chemours	ch2	20		12.58	0.43	0.80	2.57	10.01	83.48	11.58	6.99	5.84	0.36	0.80	0.020	6.0	
chemours	ch3	30		11.80	0.36	0.71	3.01	8.60	71.72	22.28	9.04	6.48	0.54	2.01	0.033	8.3	
chemours	ch4	35		11.74	0.35	0.76	3.26	8.48	70.72	22.70	11.70	8.27	0.76	2.66	0.041	9.1	
chez-le-han	ch1	50		11.98	0.46	0.85	3.68	8.81	69.22	21.42	2.69	1.86	0.20	1.63	0.012	8.0	
chez-le-han	ch2	75		11.72	0.44	0.88	3.38	8.34	69.56	23.68	2.71	1.88	0.18	1.64	0.012	7.7	
chez-le-han	ch3	100		11.76	0.39	0.82	3.22	8.54	71.22	22.34	2.90	2.07	0.19	1.65	0.011	8.3	
chez-le-han	ch4	115		11.75	0.41	0.88	3.55	9.20	76.73	18.17	2.72	2.09	0.14	0.49	0.011	6.2	
chez-le-han	ch5	120		11.77	0.38	0.83	3.28	8.49	70.81	22.63	2.97	2.81	0.19	1.67	0.011	8.6	
chez-le-han	ch6	125.5		11.91	0.40	0.86	3.77	8.76	68.05	24.41	3.60	2.45	0.27	0.88	0.014	9.4	
corailled	co1	10		13.11	0.40	0.79	3.22	9.89	82.48	11.08	5.18	4.19	0.33	0.56	0.020	8.1	
corailled	co2	20		11.85	0.33	0.67	3.07	8.78	73.23	20.63	4.73	3.46	0.29	0.98	0.016	9.2	
corailled	co3	30		11.72	0.33	0.75	3.20	8.52	71.06	23.54	4.33	3.01	0.27	0.95	0.014	9.3	
corailled	co4	35		11.41	0.32	0.72	3.06	8.35	69.64	23.24	8.64	6.02	0.33	2.09	0.028	9.6	
29.7.-2.9.93																	
chemours	ch1	10		13.28	0.37	0.61	2.87	10.41	88.82	7.44	7.36	6.39	0.42	0.55	0.027	7.8	
chemours	ch2	20		12.67	0.33	0.62	2.42	10.25	83.49	9.68	6.18	5.28	0.30	0.61	0.020	7.2	
chemours	ch3	30		12.41	0.31	0.63	2.62	9.81	81.82	12.94	4.34	1.55	0.23	0.56	0.013	8.5	
chemours	ch4	35		12.50	0.31	0.63	2.77	9.71	81.15	13.31	9.14	7.42	0.51	1.22	0.028	8.9	
chez-le-han	ch1	50		11.08	0.32	0.55	2.50	10.59	88.52	6.68	3.30	2.91	0.17	0.25	0.011	7.8	
chez-le-han	ch2	75		13.22	0.31	0.58	2.74	10.48	87.40	7.12	3.71	3.24	0.20	0.26	0.012	8.8	
chez-le-han	ch3	100		13.15	0.32	0.60	3.47	9.68	80.73	12.13	3.25	2.62	0.23	0.40	0.019	10.8	
chez-le-han	ch4	115		12.94	0.31	0.59	2.58	10.36	86.40	8.44	3.57	3.08	0.18	0.30	0.011	8.2	
chez-le-han	ch5	120		12.75	0.29	0.59	2.23	10.52	87.74	7.80	1.30	2.90	0.15	0.26	0.010	7.7	
chez-le-han	ch6	125.5		12.74	0.28	0.58	2.41	10.33	86.15	9.03	2.18	1.88	0.11	0.20	0.016	8.6	
corailled	co1	10		11.36	0.31	0.69	3.19	10.17	84.82	8.80	7.11	6.03	0.45	0.63	0.029	7.8	
corailled	co2	20		12.48	0.39	0.76	3.19	9.29	77.48	16.14	7.47	5.79	0.48	1.21	0.029	8.2	
corailled	co3	30		12.13	0.33	0.70	3.03	9.30	75.89	18.08	4.59	3.48	0.38	1.03	0.014	9.8	
corailled	co4	35		12.15	0.35	0.71	2.96	9.49	76.64	17.44	6.49	3.97	0.38	1.13	0.022	8.5	
2.9.-12.10.93																	
chemours	ch1	10		12.23	0.46	0.84	4.59	7.64	63.68	77.14	1.46	0.93	0.13	0.40	0.007	10.0	
chemours	ch2	20		12.03	0.45	0.82	4.78	7.76	64.71	26.74	1.66	2.37	0.34	0.98	0.016	9.6	
chemours	ch3	30		11.82	0.30	0.53	3.06	8.55	71.34	22.53	16.67	11.89	1.02	3.76	0.049	10.3	
chemours	ch4	35		11.55	0.33	0.58	3.03	8.51	71.11	22.84	21.00	14.94	1.27	4.81	0.068	9.3	
chez-le-han	ch1	50		10.92	0.43	0.86	4.19	6.73	56.14	35.49	2.16	1.21	0.18	0.77	0.019	10.2	
chez-le-han	ch2	75		11.27	0.45	0.82	4.53	6.74	56.22	34.73	1.98	1.11	0.18	0.69	0.018	10.1	
chez-le-han	ch3	100		11.34	0.41	0.84	4.18	7.16	59.67	31.96	1.84	1.03	0.15	0.39	0.018	10.2	
chez-le-han	ch4	115		11.19	0.39	0.83	4.17	7.02	58.51	33.15	1.93	1.13	0.16	0.64	0.017	10.8	
chez-le-han	ch5	120		11.21	0.35	0.78	4.07	7.14	59.57	32.30	1.71	1.02	0.14	0.55	0.016	11.5	
chez-le-han	ch6	122.5		11.24	0.35	0.80	4.09	7.17	59.84	32.03	2.70	1.62	0.22	0.86	0.012	9.4	
corailled	co1	10		11.49	0.35	0.80	3.49	8.10	67.54	25.68	3.11	2.10	0.21	0.80	0.011	9.6	
corailled	co2	20		11.93	0.51	0.85	4.30	7.63	63.65	27.73	1.						

station	recharbon	prof(m)	pdc(g)	Cus (5%)	Sol (8%)	Thor (6%)	Corg (8%)	Cmin (6%) (Corg-Corg)	Carbonates (Cmin + 8.33) (%)	Réside insoluble (100-Corg) (%)	Mat. tot. (g/m ²)	Flux carbone (g/m ²)	Flux de matière organique (Corg + 2) (g/m ²)	Flux de résidu (insoluble) (g/m ²)	Flux d'azote (g/m ²)	C/N (Corg/Nmin)
chez-le-ban	chb1	50	0.3841	0.20	0.42	0.82	3.94	6.26	52.21	39.91	2.14	1.11	0.17	0.83	0.009	9.3
chez-le-ban	chb2	75	0.592	0.08	0.40	0.83	3.43	6.57	53.82	38.32	3.28	1.80	0.22	1.26	0.013	8.5
chez-le-ban	chb3	100	0.9814	0.10	0.39	0.79	3.23	6.87	57.27	36.27	5.32	3.03	0.34	1.91	0.020	8.7
chez-le-ban	chb4	115	1.3501	0.04	0.37	0.74	3.32	6.72	56.08	34.29	6.81	3.82	0.45	2.54	0.025	9.0
chez-le-ban	chb5	129	1.309	0.03	0.36	0.71	3.20	6.74	56.21	33.20	7.75	4.08	0.48	2.70	0.027	8.8
chez-le-ban	chb6	124	1.5272	0.05	0.36	0.73	3.16	6.89	57.44	36.25	8.43	4.83	0.53	3.06	0.030	8.8
corail	co1	10	0.8110	0.61	0.35	0.58	3.31	8.40	70.03	23.54	4.49	3.14	0.29	1.06	0.016	9.0
corail	co2	20	1.068	0.17	0.33	0.57	3.22	7.95	66.32	27.24	5.91	3.92	0.38	1.61	0.019	9.8
corail	co3	30	0.8224	0.20	0.34	0.57	3.22	7.98	66.55	27.01	4.85	3.03	0.29	1.25	0.015	9.3
corail	co4	35	1.6381	0.40	0.32	0.59	3.18	8.22	68.55	25.09	9.07	6.22	0.58	2.28	0.020	9.9
3.12-3.1.94																
chez-le-ban	chb1	10	1.469	0.27	0.34	0.64	3.24	7.03	58.62	34.89	6.03	3.54	0.39	2.14	0.020	9.7
chez-le-ban	chb2	20	1.591	0.13	0.32	0.59	3.12	7.01	58.47	35.29	6.54	3.82	0.41	2.31	0.021	9.7
chez-le-ban	chb3	30	1.917	0.18	0.32	0.64	3.15	7.03	58.61	35.09	7.87	4.62	0.50	2.76	0.023	9.9
chez-le-ban	chb4	75	2.148	0.25	0.31	0.62	3.02	7.23	60.27	33.69	8.82	5.32	0.53	2.97	0.027	9.8
chez-le-ban	chb5	100	2.527	0.21	0.32	0.65	2.99	7.23	60.22	33.80	10.38	6.28	0.62	3.51	0.033	9.4
chez-le-ban	chb6	115	2.872	0.17	0.31	0.62	3.03	7.14	59.51	32.42	11.80	7.02	0.72	4.06	0.039	9.8
chez-le-ban	chb7	120	3.216	0.14	0.31	0.63	3.00	7.15	59.60	34.80	13.21	7.87	0.79	4.54	0.040	9.8
chez-le-ban	chb8	124	1.389	0.23	0.32	0.67	3.13	6.92	57.68	33.69	13.92	8.03	0.92	4.97	0.045	10.2
corail	co1	10	4.264	0.07	0.25	0.56	2.85	7.22	60.23	34.78	17.51	10.55	1.01	5.86	0.036	10.8
corail	co2	20	3.148	0.11	0.27	0.52	2.80	7.31	61.98	33.41	21.15	12.90	1.19	7.07	0.056	10.8
corail	co3	30	6.975	0.26	0.28	0.57	2.99	7.76	63.59	31.41	28.65	17.36	1.71	9.58	0.081	10.6
corail	co4	35	6.661	0.14	0.28	0.56	2.86	7.28	61.71	33.37	27.36	16.61	1.57	9.18	0.075	10.4
3.1-1.2.94																
chez-le-ban	chb1	10	0.8457	9.25	0.35	0.79	3.51	5.73	47.83	45.15	5.71	1.78	0.26	1.68	0.013	10.2
chez-le-ban	chb2	20	0.9062	9.22	0.35	0.78	3.13	6.09	50.76	42.97	3.98	2.02	0.25	1.71	0.014	9.0
chez-le-ban	chb3	50	1.0245	9.42	0.37	0.88	3.40	6.00	50.16	43.03	4.50	2.26	0.21	1.94	0.017	9.2
chez-le-ban	chb4	75	1.1343	9.48	0.39	0.80	3.31	6.13	51.14	42.33	4.98	2.55	0.23	2.10	0.019	8.5
chez-le-ban	chb5	100	1.1517	9.38	0.34	0.81	3.29	6.88	50.80	42.61	5.06	2.57	0.33	2.15	0.017	9.7
chez-le-ban	chb6	115	1.100	9.40	0.33	0.73	3.41	5.99	49.99	41.20	4.85	2.42	0.31	2.09	0.016	10.4
chez-le-ban	chb7	120	1.1799	9.39	0.34	0.77	3.24	6.16	51.55	42.38	5.18	2.66	0.34	2.19	0.018	9.5
chez-le-ban	chb8	124	1.8902	9.24	0.33	0.74	3.11	6.13	51.15	42.63	6.98	3.57	0.43	2.98	0.023	9.5
corail	co1	10	2.8478	9.34	0.27	0.57	3.14	6.30	51.80	42.02	10.75	5.36	0.67	4.52	0.029	11.6
corail	co2	20	2.8681	9.16	0.27	0.63	2.91	6.25	52.17	43.01	11.28	5.88	0.66	4.74	0.031	10.7
corail	co3	30	2.823	9.21	0.26	0.58	2.91	6.28	52.80	41.78	12.48	6.54	0.73	5.22	0.032	11.2
corail	co4	35	3.172	9.18	0.26	0.61	2.93	6.25	52.69	42.05	13.51	7.71	0.87	6.23	0.038	11.4
1.2-8.1.94																
chez-le-ban	chb1	10	0.7265	9.93	0.35	0.73	3.15	6.78	56.53	37.17	3.19	1.60	0.20	1.19	0.011	8.9
chez-le-ban	chb2	20	0.8418	10.01	0.37	0.70	3.09	6.92	57.73	36.88	3.65	2.11	0.23	1.32	0.013	8.4
chez-le-ban	chb3	30	1.3044	9.97	0.27	0.54	2.56	7.21	61.76	33.11	5.71	3.53	0.29	1.89	0.015	9.5
chez-le-ban	chb4	45	1.8954	10.43	0.28	0.58	2.62	7.84	65.43	29.33	8.33	5.45	0.44	2.44	0.023	9.5
chez-le-ban	chb5	10	0.6949	9.10	0.38	0.80	3.42	5.57	46.46	46.69	2.72	1.03	0.13	1.03	0.008	9.0
chez-le-ban	chb6	20	0.6196	8.89	0.38	0.86	3.63	5.26	43.86	48.88	2.23	0.99	0.16	1.01	0.008	9.6
chez-le-ban	chb7	30	0.6923	8.88	0.34	0.83	3.30	5.59	46.59	46.81	2.52	1.12	0.17	1.18	0.009	9.8
chez-le-ban	chb8	75	0.7865	8.79	0.30	0.76	3.16	5.63	46.95	46.72	2.86	1.34	0.18	1.34	0.009	10.6
chez-le-ban	chb9	100	0.9711	8.83	0.32	0.71	3.17	5.68	47.34	46.32	3.54	1.68	0.22	1.64	0.011	9.9
chez-le-ban	chb10	115	1.0915	8.87	0.32	0.71	3.06	5.81	48.47	45.42	3.75	1.82	0.23	1.70	0.012	9.7
chez-le-ban	chb11	120	1.1122	8.92	0.29	0.75	3.19	5.72	47.74	45.88	4.05	1.93	0.26	1.86	0.012	10.0
chez-le-ban	chb12	124	1.4932	8.86	0.29	0.74	3.18	5.68	47.39	46.25	5.43	2.57	0.34	2.51	0.016	10.9
corail	co1	10	0.511	9.58	0.36	0.73	3.48	6.10	50.84	42.20	3.06	0.93	0.13	0.78	0.007	9.6
corail	co2	20	0.980	9.14	0.29	0.66	3.12	6.02	50.23	43.34	3.60	1.01	0.22	1.57	0.010	10.7
corail	co3	30	0.935	9.19	0.21	0.67	3.20	5.99	49.95	43.65	3.86	1.24	0.22	1.48	0.010	10.4
corail	co4	35	1.206	9.47	0.30	0.68	3.12	6.25	52.15	41.62	4.49	2.29	0.27	1.83	0.013	10.3
8.1-2.4.94																
chez-le-ban	chb1	10	0.5112	9.53	0.72	1.20	5.70	3.83	31.93	56.65	1.51	0.48	0.17	0.86	0.011	7.9
chez-le-ban	chb2	20	0.6468	9.25	0.55	1.05	5.20	4.05	33.76	55.84	1.39	0.67	0.14	0.77	0.008	9.0
chez-le-ban	chb3	50	0.4836	9.19	0.50	1.02	4.72	4.46	33.22	53.33	1.43	0.53	0.14	0.76	0.007	9.4
chez-le-ban	chb4	75	0.6188	9.15	0.43	0.90	4.18	4.96	41.40	50.23	1.83	0.76	0.15	0.92	0.008	9.7
chez-le-ban	chb5	100	0.8062	9.26	0.43	0.89	4.07	5.19	43.26	48.58	2.39	1.03	0.19	1.16	0.010	9.5
chez-le-ban	chb6	115	1.0405	9.17	0.38	0.83	3.54	5.62	46.80	46.01	3.08	1.43	0.22	1.91	0.012	9.3
chez-le-ban	chb7	120	1.2025	8.94	0.37	0.75	3.16	5.58	46.57	46.71	3.56	1.66	0.24	1.66	0.013	9.1
chez-le-ban	chb8	124	2.0867	8.97	0.31	0.66	3.03	5.94	49.57	44.32	6.09	3.02	0.37	2.70	0.019	9.8
corail	co1	10	0.8436	9.79	0.45	0.79	4.21	5.38	46.55	45.04	2.44	1.14	0.21	1.10	0.011	9.3
corail	co2	20	1.6551	9.65	0.36	0.79	3.64	6.12	50.21	42.52	4.79	2.40	0.35	2.04	0.017	10.0
corail	co3	30	1.2978	9.78	0.44	0.79	3.98	5.80	48.40	41.64	3.76	1.82	0.30	1.61	0.017	9.0
corail	co4	35	0.895	9.88	0.47	0.89	4.18	5.50	45.90	45.34	2.50	1.19	0.23	1.17	0.012	9.4
20.8-24.5.94																
corail	co1	10	0.652	10.90	0.62	1.19	5.67	5.23	43.60	45.06	2.44	1.06	0.28	1.30	0.015	9.2
corail	co2	20	1.0444	10.22	0.52	0.99	4.79	5.43	45.29	45.13	3.97	1.80	0.38	1.79	0.021	9.5
corail	co3	30	1.634	10.04	0.49	0.97	4.50	5.53	48.23	44.27	5.05	1.83	0.36	1.77	0.019	9.2
corail	co4	35	1.419	10.93	0.52	1.05	4.43	6.40	54.16	36.58	5.11	2.88	0.47	1.97	0.027	8.6
24.5-1.6.94																
corail	co1	10	0.1222	11.71	0.54	0.94	5.22	6.49	54.17	35.44	1.95	1.05	0.20	0.89	0.010	9.7
corail	co2	20	0.221	10.87	0.48	0.93	4.57	6.10	50.64	40.82	3.52	1.79	0.32	1.41	0.016	10.0
corail	co3	30	0.0992	13.19	0.60	1.16	7.31	5.66	47.37	37.61	0.62	0.30	0.09	0.23	0.004	12.6
corail	co4	35	0.058	12.40	0.66	1.32	6.94	5.46	45.55	40.57	0.62	0.42	0.13	0.37	0.006	10.5
1.6-6.7.94																
chez-le-ban	chb1	50	1.349	11.81	0.28	0.50	2.78	9.03	75.01	19.13	4.67	3.65	0.25	0.93	0.013	10.0
chez-le-ban	chb2	75	1.527	11.92	0.29	0.56	2.81	9.11	75.94	18.43	5.56	4.22	0.31	1.02	0.016	9.8
chez-le-ban	chb3	100	1.589	11.61	0.31	0.64	2.95									

station	rehabilitation	prof(m)	pdv(g)	Cin (M)	Nitr (M)	Hlor (M)	Corg (M)	Conc (M)	Carbonates	Résidu	Rox (eq)	flux	flux	flux	flux	C/N
								(Cin + Corg)	(Cin + 8.33)	(M + Carb.)	(g/m²)	(g/m²)	(g/m²)	(g/m²)	(g/m²)	(Corg/Nit)
cher-le-han	chb4	115	0.916	12.34	0.27	0.51	2.85	9.39	79.19	15.35	2.64	2.35	0.16	0.44	0.008	10.5
cher-le-han	chb5	120	0.8525	12.29	0.24	0.48	2.73	9.53	79.68	14.64	2.65	2.11	0.15	0.39	0.008	11.3
cher-le-han	chb6	124	0.7655	12.18	0.26	0.47	2.84	9.34	77.88	14.01	2.19	1.71	0.18	0.31	0.006	10.8
corailled	co1	10	2.1337	13.23	0.41	0.69	4.08	9.17	76.52	17.63	6.63	5.07	0.49	1.17	0.027	9.8
corailled	co2	20	1.6358	11.84	0.27	0.53	2.93	8.92	74.36	19.97	5.14	3.82	0.29	1.03	0.014	10.7
corailled	co3	30	1.335	11.82	0.28	0.49	2.83	8.94	74.97	19.36	4.35	3.11	0.24	0.80	0.012	10.0
corailled	co4	35	1.6029	11.78	0.28	0.54	2.84	8.94	73.55	19.29	4.98	3.71	0.31	0.96	0.014	10.2
chevroux	ch1	10	1.3741	13.07	0.36	0.52	3.08	9.99	83.33	10.99	4.37	3.64	0.25	0.48	0.016	8.6
chevroux	ch2	20	1.9438	12.23	0.29	0.55	2.84	9.39	78.29	16.08	6.19	4.85	0.35	1.00	0.018	9.9
chevroux	ch3	30	2.4712	12.20	0.26	0.52	2.81	9.38	78.26	16.33	7.87	6.16	0.43	1.38	0.020	10.9
chevroux	ch4	35	2.2652	12.26	0.29	0.50	2.71	9.33	79.65	17.27	7.21	5.74	0.50	1.00	0.021	9.4
20.12.16.10.94																
cher-le-han	chb1	50	0.2539	12.36	0.45	0.79	4.04	8.34	69.57	21.89	1.15	0.80	0.10	0.25	0.005	9.0
cher-le-han	chb2	75	0.5062	12.23	0.50	0.82	4.27	7.36	66.35	25.31	2.30	1.53	0.19	0.58	0.011	8.6
cher-le-han	chb3	100	0.591	12.40	0.51	0.75	4.17	8.23	68.80	23.38	2.46	1.69	0.20	0.58	0.011	8.1
cher-le-han	chb4	115	0.3066	12.31	0.45	0.76	4.01	8.30	69.19	23.13	1.39	0.96	0.11	0.32	0.006	9.0
cher-le-han	chb5	120	0.4231	12.09	0.40	0.62	3.82	8.27	69.09	23.01	1.92	1.33	0.15	0.44	0.008	9.5
cher-le-han	chb6	124	0.5372	12.16	0.45	0.75	3.99	8.17	68.15	21.24	2.44	1.66	0.26	0.52	0.011	8.9
corailled	co1	10	0.9415	14.20	0.72	0.94	5.31	8.89	74.16	16.59	2.24	1.66	0.21	0.37	0.016	7.3
corailled	co2	20	0.5134	12.97	0.60	0.88	4.63	8.79	69.14	23.08	2.33	1.63	0.18	0.54	0.014	7.8
corailled	co3	30	0.4492	12.23	0.45	0.72	3.90	8.13	69.44	22.87	2.04	1.42	0.16	0.47	0.009	8.8
corailled	co4	35	0.6002	12.20	0.44	0.74	3.85	8.15	69.65	18.70	2.04	1.46	0.24	0.39	0.009	8.7
chevroux	ch1	10	0.223	14.08	0.74	0.98	5.83	8.26	68.85	23.94	0.97	0.67	0.07	0.23	0.007	7.9
chevroux	ch2	20	0.781	12.29	0.41	0.73	3.69	8.68	72.41	20.87	1.43	2.48	0.23	0.72	0.014	6.9
chevroux	ch3	30	1.0445	11.87	0.40	0.70	3.36	8.50	70.93	22.44	4.85	3.44	0.32	1.09	0.019	6.5
chevroux	ch4	35	1.181	11.90	0.34	0.62	3.32	8.58	71.56	20.04	5.05	3.62	0.42	1.01	0.017	9.6
18.10.23.11.94																
cher-le-han	chb1	50	0.1945	11.55	0.41	0.82	4.20	7.35	61.34	29.48	1.37	0.72	0.11	0.35	0.005	9.8
cher-le-han	chb2	75	0.1375	11.55	0.30	0.77	4.59	6.96	58.04	33.50	0.88	0.51	0.07	0.29	0.004	11.5
cher-le-han	chb3	100	0.1943	11.65	0.41	0.80	4.23	7.42	61.88	29.30	1.24	0.77	0.10	0.37	0.005	10.4
cher-le-han	chb4	115	0.1955	11.51	0.41	0.86	4.21	7.29	60.84	29.30	1.24	0.76	0.12	0.26	0.005	10.3
corailled	co1	10	0.3395	12.61	0.59	1.01	4.93	7.68	64.03	37.72	2.16	1.28	0.18	0.60	0.013	8.3
corailled	co2	20	0.3484	12.11	0.47	0.85	4.13	7.99	66.60	26.97	2.22	1.48	0.14	0.60	0.010	8.8
corailled	co3	30	0.1818	11.59	0.33	0.60	3.22	8.37	69.84	24.13	0.48	4.53	0.19	1.56	0.021	9.7
corailled	co4	35	0.572	11.12	0.10	0.60	3.01	8.30	69.24	20.07	6.01	6.93	0.07	2.01	0.039	10.2
chevroux	ch1	10	0.1006	12.70	0.55	0.93	5.34	7.36	61.35	31.53	0.69	0.43	0.05	0.22	0.004	9.8
chevroux	ch2	20	0.1325	11.47	0.37	0.60	3.56	8.41	20.12	23.72	3.05	2.13	0.19	0.72	0.011	9.5
chevroux	ch3	30	1.2207	11.71	0.33	0.57	3.08	8.63	71.99	21.85	8.85	6.37	0.55	1.93	0.029	9.3
chevroux	ch4	35	2.6649	11.68	0.23	0.58	3.08	8.61	71.69	16.50	16.52	11.34	1.95	2.73	0.054	9.4
7.11.23.11.94																
cher-le-han	chb1	10	0.1103	10.70	0.52	1.07	5.90	4.79	39.96	50.61	0.77	0.31	0.07	0.39	0.004	11.4
cher-le-han	chb2	30	0.107	10.87	0.47	1.03	4.71	6.35	31.32	40.59	0.80	0.41	0.06	0.33	0.003	10.0
cher-le-han	chb3	50	0.1069	10.61	0.43	0.82	4.05	6.56	54.69	37.42	0.67	0.36	0.05	0.25	0.003	9.5
cher-le-han	chb4	75	0.131	10.89	0.41	0.89	3.94	6.65	55.48	36.82	0.98	0.50	0.08	0.36	0.004	9.6
cher-le-han	chb5	100	0.163	10.42	0.39	0.87	3.85	6.57	54.80	37.93	1.22	0.62	0.09	0.46	0.003	10.0
cher-le-han	chb6	115	0.18	10.54	0.39	0.83	3.62	6.92	57.69	35.51	1.35	0.78	0.09	0.48	0.005	9.2
chevroux	ch1	120	0.213	10.48	0.36	0.77	3.40	7.09	59.10	34.54	1.60	0.94	0.10	0.55	0.008	9.4
chevroux	ch2	124	0.46	10.47	0.31	0.73	3.18	7.23	60.31	29.88	1.45	2.08	0.34	1.03	0.011	10.1
corailled	co1	10	0.286	11.80	0.54	0.98	4.90	6.89	57.48	34.56	2.14	1.23	0.17	0.74	0.012	9.1
corailled	co2	20	0.444	11.47	0.43	0.78	3.96	7.49	62.48	30.78	3.33	2.08	0.22	1.02	0.014	9.2
corailled	co3	30	0.753	11.31	0.32	0.65	3.37	7.91	66.19	27.46	5.67	3.72	0.36	1.44	0.019	10.2
corailled	co4	35	0.872	11.09	0.34	0.64	3.17	7.92	66.02	25.26	6.83	4.31	0.30	1.52	0.023	9.2
chevroux	ch1	10	0.085	11.29	0.53	0.95	5.36	5.93	49.45	42.22	0.41	0.20	0.03	0.17	0.002	10.2
chevroux	ch2	20	0.117	11.33	0.46	0.75	4.17	7.16	59.71	34.21	0.88	0.52	0.05	0.20	0.004	10.4
chevroux	ch3	30	0.156	11.37	0.32	0.67	3.04	8.53	71.12	22.72	4.19	2.98	0.26	1.05	0.013	9.6
chevroux	ch4	35	0.992	11.45	0.33	0.63	3.08	8.36	69.76	15.76	7.43	5.18	1.08	1.17	0.024	9.4
24.11.19.12.94																
cher-le-han	chb1	10	0.1039	12.28	0.40	1.10	7.24	5.08	42.07	47.11	0.51	0.22	0.06	0.24	0.003	14.5
cher-le-han	chb2	30	0.1035	10.84	0.44	1.05	5.41	5.42	45.23	45.25	0.53	0.24	0.05	0.25	0.002	12.2
cher-le-han	chb3	50	0.1394	10.86	0.42	0.93	4.76	6.10	50.91	40.44	0.81	0.41	0.07	0.33	0.003	11.4
cher-le-han	chb4	75	0.1067	10.62	0.43	0.93	4.48	6.14	51.25	40.91	1.56	0.80	0.12	0.64	0.007	10.9
cher-le-han	chb5	100	0.1823	10.34	0.40	0.81	3.92	6.41	51.50	39.10	1.94	1.04	0.14	0.76	0.008	9.8
cher-le-han	chb6	115	0.3876	10.36	0.30	0.69	3.70	6.86	55.56	37.36	2.99	1.66	0.21	1.12	0.009	12.2
cher-le-han	chb7	121	0.7634	10.35	0.34	0.64	3.44	6.91	57.62	33.83	3.89	2.24	0.25	1.39	0.013	10.2
cher-le-han	chb8	124	1.1916	10.32	0.32	0.71	3.28	7.04	58.70	31.62	6.07	3.56	0.29	1.92	0.020	10.2
corailled	co1	10	0.1328	11.98	0.48	0.88	4.84	7.14	59.58	32.63	1.92	1.13	0.15	0.63	0.009	10.1
corailled	co2	20	0.4455	11.60	0.36	0.70	3.90	7.71	64.28	28.45	2.40	1.55	0.17	0.68	0.009	10.9
corailled	co3	30	0.319	11.58	0.33	0.63	3.62	7.94	66.70	26.61	1.85	1.22	0.13	0.49	0.006	11.0
corailled	co4	35	0.5028	11.49	0.34	0.65	3.57	7.93	66.10	25.06	3.37	2.23	0.20	0.85	0.011	10.5
chevroux	ch1	10	0.198	11.52	0.50	0.84	4.42	7.10	59.18	31.30	1.01	0.60	0.07	0.34	0.005	8.8
chevroux	ch2	20	0.404	11.39	0.37	0.63	3.56	7.82	65.25	27.95	2.06	1.34	0.14	0.56	0.008	9.7
chevroux	ch3	30	0.863	11.48	0.36	0.61	3.40	8.08	67.42	26.02	4.40	2.90	0.19	1.14	0.016	9.4
chevroux	ch4	35	1.421	11.58	0.32	0.58	3.28	8.20	69.19	21.60	7.24	5.01	0.67	1.56	0.023	10.4
19.12.21.1.95																
cher-le-han	chb1	10	1.412	11.97	0.59	0.74	4.61	6.46	53.09	37.34	4.18	2.35	0.35	1.58	0.025	7.9
cher-le-han	chb2	30	1.897	10.92	0.49	0.67	4.18	6.74	56.23	34.79	5.59	3.14	0.30	1.94	0.027	8.6
cher-le-han	chb3	50	1.376	10.99	0.57	0.76	4.50	6.49	54.69	37.19	4.07	2.20	0.36	1.52	0.023	7.9
cher-le-han	chb4	75	1.788	10.97	0.51	0.73	4.36	6.61	55.69	37.14	5.29	2.92				

Annexe 4.9. Paramètres calculés lors de l'estimation de la resuspension hivernale

	Chez-le-Bart (Flux resuspensif)	Cortailfod (Flux resuspensif)	Chevroux (Flux resuspensif)	Dz (eau)
Jo [g/m ²]				
Jo (22.12.92)	5.74			
Jo (2.2.93)	3.69			
Jo (15.3.93)	5.89			
Jo (20.4.93)	2.48			
Jo (29.7.93)	2.94			
Jo (13.10.93)	1.77	17.48	35.27	
Jo (10.11.93)	3.89	13.97	26.41	
Jo (3.12.93)	6.75	8.62	19.80	
Jo (3.1.94)	11.53	27.43		
Jo (1.2.94)	3.81	9.77		
Jo (8.3.94)	2.59	3.11	9.11	
Jo (20.4.94)	3.29			
Jo (6.7.94)	3.32			
Jo (18.10.94)	0.96			
Jo (7.11.94)	0.09	15.15	29.88	
Jo (24.11.94)	2.24	8.72	13.68	
Jo (19.12.94)	4.89	3.29	10.70	
Jo (31.1.95)	10.84	16.62	34.59	
Jo (24.3.95)	3.01	6.84	8.62	
b [1/m]				
b (22.12.92)	0.0127			
b (2.2.93)	0.0099			
b (15.3.93)	0.0136			
b (20.4.93)	0.0310			
b (29.7.93)	0.4698			
b (13.10.93)	0.4734	0.0822	0.0964	
b (10.11.93)	0.0835	0.0913	0.2336	
b (3.12.93)	0.0201	0.0239	0.0794	
b (3.1.94)	0.0072	0.0195		
b (1.2.94)	0.0043	0.0133		
b (8.3.94)	0.0086	0.0283	0.0605	
b (20.4.94)	0.0518			
b (6.7.94)	0.1341			
b (18.10.94)	1.9785			
b (7.11.94)	0.1406	0.0845	0.1209	
b (24.11.94)	0.0265	0.0520	0.1293	
b (19.12.94)	0.0558	0.0247	0.0944	
b (31.1.95)	0.0148	0.0197	0.0962	
b (24.3.95)	0.0104	0.0183	0.0768	
v (été) [m/j]	3.94			
v (automne) [m/j]	4.38	3.82	3.82	
v (hiver) [m/j]	4.72	6.37	6.37	
Dz [cm ² /s]				
Dz (22.12.92)	40.1			
Dz (2.2.93)	55.0			
Dz (15.3.93)	40.0			
Dz (20.4.93)	17.6			
Dz (29.7.93)	1.0			
Dz (13.10.93)	1.1	5.4	4.6	
Dz (10.11.93)	6.1	4.8	1.9	
Dz (3.12.93)	25.3	16.5	5.6	
Dz (3.1.94)	76.1	37.7		
Dz (1.2.94)	125.8	55.4		
Dz (8.3.94)	63.6	26.0	12.2	
Dz (20.4.94)	10.5			
Dz (6.7.94)	3.4			
Dz (18.10.94)	0.3			0.15
Dz (7.11.94)	3.6	5.2	3.7	0.5
Dz (24.11.94)	17.8	8.5	3.4	1.77
Dz (19.12.94)	9.1	17.9	4.7	1.83
Dz (31.1.95)	36.9	37.4	7.7	
Dz (24.3.95)	52.3	40.3	9.6	
Dz (moyenne été)	2.19			
Dz (moyenne automne)	10.5	10.1	4.0	
Dz (moyenne hiver)	70.9	39.4	9.8	

Annexe 4.10. Flux resuspensifs Jo, R1 et R2

	Chez-le-Bart [g/m2*j]	Cortaillod [g/m2*j]	Chevroux [g/m2*j]		Chez-le-Bart [g/m2*j]	Cortaillod [g/m2*j]	Chevroux [g/m2*j]
Jo (21.7.92)	-	0.00	0.20	R1 (1.2.94)	2.94	7.58	-
Jo (20.8.92)	-	0.00	4.52	R1 (8.3.94)	1.59	1.86	3.44
Jo (25.9.92)	-	0.50	4.20	R1 (20.4.94)	0.50	1.86	0.00
Jo (1.11.92)	-	6.90	27.80	R1 (24.5.94)	-	1.09	-
Jo (22.12.92)	5.74	3.50	13.00	R1 (1.6.94)	-	0.53	-
Jo (2.2.93)	3.69	2.40	3.50	R1 (6.7.94)	0.20	0.00	-
Jo (15.3.93)	5.89	0.74	2.21	R1 (10.8.94)	0.00	0.00	0.00
Jo (20.4.93)	2.48	1.35	0.52	R1 (20.9.94)	0.00	0.00	0.62
Jo (11.5.93)	0.00	0.46	0.33	R1 (18.10.94)	0.00	2.18	3.51
Jo (16.6.93)	-	1.03	0.95	R1 (7.11.94)	0.01	4.37	6.17
Jo (2.7.93)	-	2.11	9.35	R1 (24.11.94)	0.61	3.68	2.65
Jo (29.7.93)	2.94	3.56	4.96	R1 (19.12.94)	0.69	2.25	2.78
Jo (2.9.93)	0.00	0.00	1.78	R1 (31.1.95)	4.93	11.49	8.84
Jo (13.10.93)	1.77	17.48	35.27	R1 (24.3.95)	1.68	4.85	2.68
Jo (10.11.93)	3.89	13.37	26.41				
Jo (3.12.93)	6.75	8.62	19.80	R2 (21.7.92)	-	2.22	2.24
Jo (3.1.94)	11.53	27.43	-	R2 (20.8.92)	-	1.31	0.39
Jo (1.2.94)	3.81	9.77	-	R2 (25.9.92)	-	2.86	4.87
Jo (8.3.94)	2.59	3.11	9.11	R2 (1.11.92)	-	5.60	1.50
Jo (20.4.94)	3.29	0.15	-	R2 (22.12.92)	1.34	3.60	3.45
Jo (24.5.94)	-	2.87	-	R2 (2.2.93)	1.18	1.18	0.57
Jo (1.6.94)	-	0.00	-	R2 (15.3.93)	1.23	0.76	1.57
Jo (6.7.94)	3.32	1.21	-	R2 (20.4.93)	0.07	1.49	0.55
Jo (10.8.94)	0.00	0.00	0.07	R2 (11.5.93)	0.00	0.29	1.37
Jo (20.9.94)	0.00	0.00	2.84	R2 (16.6.93)	-	0.00	0.67
Jo (18.10.94)	0.98	0.00	4.08	R2 (2.7.93)	-	6.14	5.40
Jo (7.11.94)	0.09	15.15	29.88	R2 (29.7.93)	0.00	0.33	3.89
Jo (24.11.94)	2.24	8.72	13.68	R2 (2.9.93)	0.00	2.43	2.35
Jo (19.12.94)	4.89	3.29	10.70	R2 (13.10.93)	0.00	1.65	2.26
Jo (31.1.95)	10.84	16.62	34.59	R2 (10.11.93)	0.00	0.99	0.05
Jo (24.3.95)	3.01	6.84	8.62	R2 (3.12.93)	0.68	4.24	2.02
				R2 (3.1.94)	5.06	15.34	-
R1 (21.7.92)	-	2.18	2.27	R2 (1.2.94)	2.31	6.57	-
R1 (20.8.92)	-	1.20	0.70	R2 (8.3.94)	0.97	1.34	1.57
R1 (25.9.92)	-	3.00	6.52	R2 (20.4.94)	0.01	1.86	-
R1 (1.11.92)	-	9.05	15.40	R2 (24.5.94)	-	0.89	-
R1 (22.12.92)	2.88	5.06	9.76	R2 (1.6.94)	-	0.82	-
R1 (2.2.93)	2.11	3.64	5.18	R2 (6.7.94)	0.00	0.00	-
R1 (15.3.93)	2.82	1.19	2.67	R2 (10.8.94)	0.00	0.00	0.00
R1 (20.4.93)	0.63	2.01	0.74	R2 (20.9.94)	0.00	0.00	0.54
R1 (11.5.93)	0.00	0.31	1.43	R2 (18.10.94)	0.00	2.29	2.17
R1 (16.6.93)	-	0.00	0.79	R2 (7.11.94)	0.00	1.38	1.00
R1 (2.7.93)	-	5.50	7.09	R2 (24.11.94)	0.09	1.91	0.37
R1 (29.7.93)	0.05	0.38	4.88	R2 (19.12.94)	0.01	1.86	0.72
R1 (2.9.93)	0.00	2.14	2.34	R2 (31.1.95)	1.98	9.24	2.23
R1 (13.10.93)	0.03	5.14	9.00	R2 (24.3.95)	0.91	3.97	0.94
R1 (10.11.93)	0.37	3.58	2.88				
R1 (3.12.93)	2.46	5.55	5.99				
R1 (3.1.94)	7.60	19.03	-				

Annexe 4.11. Moyennes des flux resuspendifs

	PLAINE [g/m ² ·j]	TOMBANTS [g/m ² ·j]
R1 (92-93)	2.20	4.09
R1 (93-94)	2.46	6.17
R1 (94-95)	2.07	5.38
R1 (moyenne hiver)	2.24	5.21
R2 (92-93)	1.01	1.78
R2 (93-94)	1.45	4.46
R2 (94-95)	0.86	2.85
R2 (moyenne hiver)	1.10	3.03
R1 (92)		5.31
R1 (93)	0.02	3.25
R1 (94)	0.05	0.62
R1 (moyenne été)	0.04	3.06
R2 (92)		2.71
R2 (93)	0.00	2.13
R2 (94)	0.00	0.51
R2 (moyenne été)	0.00	1.78
R1 (moyenne année)	1.14	4.14
R2 (moyenne année)	0.55	2.41
	[mg/m ² ·j]	[mg/m ² ·j]
R1 (Corg hiver)	52.71	99.01
R1 (Corg été)	0.84	58.17
R2 (Corg hiver)	25.94	57.57
R2 (Corg été)	0.00	33.88
R1 (N hiver)	5.10	9.10
R1 (N été)	0.08	5.35
R2 (N hiver)	2.51	5.29
R2 (N été)	0.00	3.11
R1 (P hiver)	1.34	2.41
R1 (P été)	0.02	1.42
R2 (P hiver)	0.66	1.40
R2 (P été)	0.00	0.82
R1 moyen (Corg)	26.77	78.59
R1 moyen (N)	2.59	7.22
R1 moyen (P)	0.68	1.91
R2 moyen (Corg)	12.97	45.73
R2 moyen (N)	1.26	4.20
R2 moyen (P)	0.33	1.11
Budget	Budget [mg/m ² ·j]	Budget [t/an]
Charge totale de la resuspension	2638	209938
Bioproduction (Corg)**	657	52296
Charge (Corgresusp)	52.7	4193
Charge (N)*	60.5	4815
Charge (Nresusp)	4.91	391
Charge (P)*	3.87	308
Charge (P)**	1.88	150
Charge (Presusp)	1.30	103
	[%]	
Presusp(R1)/Pcharge**	68.8	
Nresusp(R1)/Ncharge*	8.1	
Budget du Phosphore	[mg P/m ²]	[t]
Charge au lac	688	150
Charge été hypo (R1)	131	29
Charge été épi (R2)	76	16
Charge hiver hypo (R1)	343	75
Charge hiver épi (R2)	188	41
Sédiments (1cm, 80%porosité)	2760	601
Stock du lac	1300	283
Sédimentation	362	79

*: (source: OFPE, 1987)

** : (source: OFEFP, 1994)

Annexe 5.1. Susceptibilité magnétique volumique (10exp-5 SI)

Prof (cm)	C18	C13	C24	C10	C15	C26	C14	C7	C23	C25
0										
2										
4										
6	3.3	6.2	4.6			5.6		4.9	4.1	5.2
8	3.6	7	4.6	4.7		5.7	3.9	5.8	4.4	5.9
10	3.8	7.2	4.6	4.9		5.5	4.8	5.7	4.8	6.5
12	3.9	7	4.8	4.6		5.2	5.3	5.4	4.9	6.8
14	4.1	6.4	5.4	4.6		5.1	5.2	4.9	5	6.8
16	4.6	6	5.4	4.6		5.5	5	4.6	4.9	6.8
18	4.8	5.4	5.8	4.6		5.6	4.5	4.3	5.1	6.6
20	4.5	5.4	6.2	4.7	3.6	5.8	3.3	4.2	5.2	6.6
22	3.5	5.6	6	5	3.8	6.5	2.5	4.1	5.3	7.1
24	2.6	5.6	5.8	5.4	3.8	6.9	2.2	4.1	5.5	7.1
26	2.2	5.8	5.6	5.8	3.8	7.2	2.5	4.3	5.4	6.9
28	2.4	6	5.8	5.9	3.8	7.5	2.9	4.2	5.4	6.8
30	2.3	6.3	5	5.8	3.5	7.5	2.9	4.3	5.3	6.5
32	1.9	6.3	4.4	5.7	3.5	7.6	2.6	4.3	5.3	6.4
34	1.9	6.5	3.8	5.8	3.8	7.7	2.4	4.6	5.6	6.2
36	1.9	6.9	2.8	6	4.1	8.3	2.3	4.8	5.7	6.5
38	1.4	7	2.8	6.3	4.1	8.6	2.1	5	5.6	6.8
40	1.6	7.4	2.8	6.6	4.3	9	2.1	5	5.7	6.9
42	2	7.8	2.6	6.9	4.6	9	2.4	4.8	5.9	6.8
44	1.9	7.9	2.5	7.2	4.7	8.9	2.4	5.1	6	6.8
46	1.6	7.8	2.7	7.4	4.8	9.3	2.4	5.2	5.9	6.7
48	1.6	7.7	2.6	7.6	4.8	9.8	2.1	5.1	5.9	6.7
50	1.9	7.6	3	7.4	5.1	10	2.4	5.1	6	8.6
52	1.8	6.8	2.9	6.4	5.1	10.1	2.3	5.2	6.2	6.9
54	2	8.3	3.1	6.2	5.2	10.5	2.2	5	6.2	6.9
56	2.6	6.6	3.6	5.4	5.3	10.8	2.3	4.9	6.3	6.9
58	2.4	6.7	3		5	10.2	2.3	5	6.4	6.9
60	2.6	7	2.8		5.1	9.6	2.4	4.8	6.4	6.8
62	2.8	7	3.3		5.3	8.8	2.4	5.1	6.5	7
64	2.6	6.8	3		5.7	8.4	2.2	5.4	6.8	6.9
66	2.6	6.5	3.5		5.9	7.9	2.2	5.6	6.8	7
68		6.9	3.8		5.5	7.3		5.3	6.5	7.1
70		6.3	3.5		4.7	7.1		5.3		7.1
72		5.8			4.1	7.1		5.5		6.9
74		5.8			3.7	7		5.4		
76		5.6				6.8		5.4		
78		5.7				6.8		5.5		
80		5.9				7		5.3		
82		5.7				6.8				

Annexe 5.2. Datations AMS-C14

No.	Carotte prof (cm)	No. de Labo	Age AMS C14 (BP)	d13C(‰)	Age AMS cal.(BC-AD)	type de matériel
1	C19-61.5	OXA-4721	705±55		1298±47AD	brindille
2	C19-68.5	OXA-4722	755±65		1242±61AD	feuille
3*	LN04-180	ETH-7436	1215±55	(-)28.0±1.0	805±68AD	macro.terr.
4	C19c-73-78	ETH-13274	2700±60	(-)1.8±1.2	876±49BC	osira + lam.

*Schwalb (1992)

Annexe 5.3.A. Granulométrie de la carotte C19c

échantillon	prof (cm)	0.5-1µm	1-2µm	2-4µm	4-8µm	8-16µm	16-31µm	31-62µm	62-124µm	médiane(µm)	moyenne(µm)
C19c-1	0.50	2.26	6.61	24.90	38.60	16.65	9.65	1.33	0	4.94	7.40
C19c-3	2.5	2.22	6.94	25.56	39.36	17.33	8.59	0	0	4.86	6.72
C19c-5	4.5	1.9	6.42	22.83	32.49	17.79	12.74	5.84	0	5.37	9.61
C19c-7	6.5	2.83	9.49	31.98	39.86	13.66	2.17	0	0	4.27	5.25
C19c-9	8.5	4.77	14.17	36.48	38.47	6.02	0.09	0	0	3.75	4.01
C19c-11	10.5	3.76	12.3	36.42	38.52	9	0	0	0	3.89	4.3
C19c-13	12.5	2.41	9.35	31.83	42.34	9.75	4.31	0	0	4.31	5.44
C19c-15	14.5	1.83	7.55	29.81	41.55	11.07	8.2	0	0	4.56	6.17
C19c-17	16.5	3.28	12.05	33.24	36.15	10.17	5.11	0	0	4.07	5.4
C19c-21	20.5	4.27	14.64	39.33	35.27	6.09	0.4	0	0	3.64	3.96
C19c-25	24.5	4.47	12.07	36.16	37.92	7.49	1.89	0	0	3.87	4.53
C19c-29	28.5	4.15	11.84	36.33	36.85	8.49	2.34	0	0	3.9	4.68
C19c-33	32.5	5.98	15.09	38.26	35.07	5.38	0.21	0	0	3.59	3.87
C19c-37	36.5	6.54	14.54	36.76	35.49	6.4	0.27	0	0	3.66	3.93
C19c-41	40.5	3.96	12.43	35.03	38.64	8.64	1.31	0	0	3.93	4.52
C19c-45	44.5	5.6	11.71	33.07	37.71	10.33	1.58	0	0	3.98	4.67
C19c-49	48.5	5.25	12.5	35.26	38.29	8.06	0.64	0	0	3.87	4.34
C19c-53	52.5	5.65	14.18	36.8	39.07	4.3	0	0	0	3.68	3.85
C19c-57	56.5	6.61	15.07	36.95	34.09	5.84	1.44	0	0	3.6	4.03
C19c-61	60.5	6.14	13.66	34.13	35.63	8.68	1.76	0	0	3.81	4.47
C19c-65	64.5	6.77	16.27	38.54	35.88	2.54	0	0	0	3.5	3.57
C19c-69	68.5	4.51	12.5	34.36	39.48	6.54	2.6	0	0	3.93	4.63
C19c-73	72.5	5.35	14.02	37.36	36.17	7.1	0	0	0	3.71	3.97
C19c-77	76.5	7.17	17.47	39.18	32.16	4.03	0	0	0	3.4	3.55
C19c-81	80.5	7.76	18.59	38.98	32.03	2.62	0	0	0	3.33	3.39

Annexe 5.3.B. Granulométrie de la carotte C7

échantillon	prof (cm)	0.5-1µm	1-2µm	2-4µm	4-8µm	8-16µm	16-31µm	31-62µm	62-124µm	médiane(µm)	moyenne(µm)
c07-1	0.5	3.54	10.2	28.99	32.99	11.84	9.88	2.57	0	4.41	7.25
c07-5	4.5	2.17	7.38	24.99	32.6	12.21	13.83	6.83	0	4.99	9.57
c07-9	8.5	2.82	9.6	30.42	36.83	13.31	6.79	0.22	0	4.38	6.17
c07-13	12.5	2.73	8.58	29.55	40.15	11.26	7.65	0.08	0	4.47	6
c07-17	16.5	2.14	8.85	27.7	33.71	9.29	10.9	7.41	0	4.63	9.15
c07-21	20.5	1.6	6.07	20.55	32.35	15.39	14.81	9.22	0	5.92	11.12
c07-25	24.5	1.53	5.69	19.92	31.59	17.33	16.52	7.43	0	6.06	10.69
c07-29	28.5	1.65	6.02	21.01	32.95	17.49	17.52	3.37	0	5.8	9.47
c07-33	32.5	1.19	5.35	18.79	30.35	17.7	13.62	13.01	0	6.51	12.83
c07-37	36.5	1.85	7.87	24.61	34.25	14.14	15.58	1.7	0	5.05	8.52
c07-41	40.5	2.03	8.78	28.1	34.59	13.13	11.56	1.8	0	4.66	7.6
c07-45	44.5	3.61	12.84	34.03	35.03	7.89	6.6	0	0	3.98	5.41
c07-53	52.5	3.51	13.04	36.57	33.42	7.86	5.58	0.01	0	3.86	5.25
c07-61	60.5	2.43	9.74	28.69	33.41	11.18	13.59	0.96	0	4.53	7.55
c07-69	68.5	3.75	13.55	34	32.5	10.19	6.02	0	0	3.94	5.37
c07-77	76.5	3.49	12.46	32.03	33.64	10.02	8.35	0.02	0	4.11	5.95

Annexe 5.4. Paramètres physiques et teneur en C,H,N

C19c

éch.	prof(cm)	H2O (%)	Porosité (%)	C (%)	Corp (%)	Cmint (%)	N (%)	Nm. (%)	Norg (%)	Htot (%)	C/Ntot	C/Norg
2361	0.5	68.10	84.73	10.467	2.57	7.89	0.25815	0.013	0.245	0.58	9.96	10.47
2362	1.5	66.10	83.52	10.484			0.2075			0.53		
2363	2.5	66.65	83.86	10.632	2.41	8.22	0.21465	0.015	0.200	0.51	11.23	12.06
2364	3.5	67.23	84.21	10.797			0.22347			0.52		
2365	4.5	66.92	84.02	10.604	2.32	8.28	0.2239	0.011	0.213	0.52	10.36	10.90
2366	5.5	59.48	79.24	10.544			0.18558			0.45		
2367	6.5	57.30	77.72	10.235	1.38	8.86	0.11695	0.007	0.110	0.33	11.80	12.57
2368	7.5	56.01	76.80	10.148			0.09143			0.30		
2369	8.5	53.86	75.22	10.081	1.17	8.91	0.0891	0.006	0.083	0.29	13.13	14.01
2370	9.5	52.27	74.00	9.986			0.06503			0.25		
2371	10.5	49.45	71.78	9.256	1.03	8.23	0.0649	0.007	0.058	0.28	15.87	17.76
2372	11.5	51.20	73.18	9.125			0.06033			0.29		
2373	12.5	51.62	73.50	9.092	0.91	8.18	0.0613	0.006	0.056	0.32	14.85	16.38
2374	13.5	51.90	73.72	9.051			0.05918			0.30		
2375	14.5	52.14	73.91	8.813	0.93	7.88	0.0641	0.009	0.055	0.31	14.51	16.79
2376	15.5	51.04	73.05	8.089			0.0597			0.34		
2377	16.5	51.71	73.58	8.189	0.84	7.35	0.0616	0.011	0.050	0.34	13.64	16.71
2378	17.5	51.81	73.65	8.210			0.06764			0.35		
2379	18.5	51.87	73.70	7.962	0.82	7.15	0.0694	0.006	0.064	0.34	11.82	12.89
2380	19.5	53.06	74.61	8.023			0.06336			0.36		
2381	20.5	52.47	74.16	8.225	0.82	7.40	0.06775	0.007	0.061	0.35	12.10	13.41
2382	21.5	52.87	74.47	7.989			0.06753			0.39		
2383	22.5	52.13	73.90	8.078	0.98	7.09	0.0698	0.011	0.059	0.36	14.04	16.61
2384	23.5	51.69	73.56	7.904			0.07734			0.39		
2385	24.5	53.54	74.98	8.149	1.03	7.12	0.08115	0.007	0.074	0.37	12.69	13.86
2386	25.5	52.86	74.46	8.153			0.0744			0.35		
2387	26.5	53.57	75.00	8.031	1.05	6.98	0.0811	0.007	0.074	0.36	12.95	14.13
2388	27.5	52.37	74.08	8.083			0.08045			0.39		
2389	28.5	52.86	75.22	7.921	0.96	6.96	0.0784	0.009	0.070	0.39	12.24	13.78
2390	29.5	55.06	76.11	7.593			0.07599			0.43		
2391	30.5	54.72	75.85	7.562	1.17	6.39	0.0894	0.006	0.084	0.43	13.09	13.98
2392	31.5	54.72	75.86	7.394			0.08653			0.47		
2393	32.5	55.39	76.35	8.212	1.22	7.00	0.08955	0.007	0.082	0.39	13.62	14.81
2394	33.5	55.80	76.64	8.103			0.09289			0.45		
2395	34.5	54.32	75.56	7.964	1.11	6.85	0.08955	0.007	0.083	0.37	12.40	13.41
2396	35.5	54.63	75.79	7.881			0.08534			0.40		
2397	36.5	56.02	76.81	7.694	1.15	6.54	0.08751	0.009	0.078	0.44	13.14	14.73
2398	37.5	54.56	75.74	7.868			0.09029			0.43		
2399	38.5	54.33	75.57	7.866	1.13	6.74	0.08725	0.010	0.077	0.40	12.95	13.69
2400	39.5	53.26	74.77	7.220			0.08653			0.45		
2401	40.5	53.28	74.78	6.912	1.00	5.91	0.0813	0.007	0.074	0.51	12.30	13.52
2402	41.5	53.42	74.88	6.280			0.08288			0.50		
2403	42.5	54.19	75.46	6.755	1.10	5.66	0.0883	0.007	0.081	0.50	12.46	13.52
2404	43.5	54.93	76.01	7.303			0.09436			0.48		
2405	44.5	54.65	75.81	7.949	1.11	6.84	0.08934	0.012	0.078	0.45	12.42	14.26
2406	45.5	55.34	76.32	8.500			0.08434			0.41		
2407	46.5	53.87	75.22	9.095	1.16	7.93	0.08036	0.007	0.073	0.38	14.43	15.78
2408	47.5	54.25	75.51	9.069			0.08361			0.36		
2409	48.5	54.31	75.55	8.881	1.09	7.80	0.08109	0.010	0.071	0.35	13.44	15.39
2410	49.5	55.08	76.12	8.910			0.0836			0.39		
2411	50.5	54.18	75.45	8.760	1.17	7.59	0.0842	0.012	0.072	0.34	13.90	16.19
2412	51.5	53.65	75.06	8.751			0.07651			0.39		
2413	52.5	54.50	75.70	9.024	1.14	7.88	0.07271	0.011	0.062	0.38	15.68	18.52
2414	53.5	53.11	74.65	8.952			0.06726			0.33		
2415	54.5	52.61	74.27	8.854	1.03	7.82	0.06707	0.009	0.058	0.36	15.36	17.67
2416	55.5	53.43	74.89	8.451			0.07216			0.35		
2417	56.5	52.62	74.28	8.214	1.10	7.11	0.06979	0.007	0.062	0.36	15.76	17.61
2418	57.5	53.84	75.20	8.763			0.07582			0.40		
2419	58.5	53.60	75.09	8.925	1.24	7.68	0.07293	0.007	0.071	0.37	15.91	17.57
2420	59.5	54.85	75.96	8.998			0.07884			0.38		
2421	60.5	55.57	76.48	9.125	1.24	7.89	0.08503	0.006	0.079	0.37	14.58	15.69
2422	61.5	54.58	75.75	8.680			0.07599			0.39		
2423	62.5	53.80	75.17	8.604	1.10	7.50	0.07546	0.003	0.072	0.39	14.58	15.25
2424	63.5	53.12	74.66	8.569			0.0751			0.38		
2425	64.5	54.06	75.37	8.612	1.12	7.49	0.07531	0.005	0.070	0.37	14.87	15.92
2426	65.5	52.64	74.29	8.973			0.06915			0.31		
2427	66.5	52.28	74.02	8.820	1.03	7.79	0.07353	0.006	0.068	0.35	14.01	15.23
2428	67.5	51.95	73.76	8.174			0.07385			0.40		
2429	68.5	51.96	73.77	8.060	1.26	6.80	0.07552	0.007	0.069	0.43	16.69	18.39
2430	69.5	52.39	74.10	7.933			0.07823			0.46		
2431	70.5	51.52	73.42	8.059	1.11	6.95	0.07917	0.009	0.070	0.43	14.02	15.80
2432	71.5	53.38	74.86	8.456			0.0727			0.40		
2433	72.5	52.31	74.04	9.183	1.11	8.07	0.07197	0.009	0.063	0.34	15.42	17.64
2434	73.5	52.33	73.98	9.413			0.06696			0.33		
2435	74.5	54.10	75.40	9.543	1.15	8.43	0.0655	0.006	0.060	0.33	16.95	18.52
2436	75.5	53.00	74.57	10.121			0.06299			0.25		
2437	76.5	52.35	74.07	10.054	1.10	8.95	0.06184	0.005	0.056	0.30	17.79	19.49
2438	77.5	51.46	73.37	10.138			0.05756			0.25		
2439	78.5	53.40	74.87	10.974	1.12	9.85	0.06038	0.007	0.053	0.25	18.55	20.94
2440	79.5	52.18	73.94	10.657			0.0561			0.24		
2441	80.5	49.34	71.69	10.730	1.00	9.74	0.05401	0.003	0.051	0.27	18.51	19.43

Annexe 5.4. Paramètres physiques et teneur en C,H,N

C37

Échantillon	prof (cm)	H ₂ O (%)	Porosité (%)	Claire (%)	Cargé (%)	Cmin (%)	Ntot (%)	Htot (%)	C/N
2121	0,5	71,83	86,89	10,37	2,67	7,70	0,2660	0,59	10,03
2122	1,5	71,60	86,76	10,44	2,48	7,96	0,2610	0,60	9,49
2123	2,5	69,89	85,79	10,22			0,2433		
2124	3,5	69,34	85,47	10,26	2,38	7,88	0,2350	0,56	10,14
2125	4,5	67,59	84,43						
2126	5,5	67,20	84,19	10,37	2,27	8,10	0,2220	0,53	10,23
2127	6,5	67,76	84,53	10,49			0,2093		
2128	7,5	66,77	83,93	10,39	2,06	8,33	0,1910	0,49	10,76
2129	8,5	68,57	85,01	10,02			0,1931		
2130	9,5	65,59	83,21	10,02	2,02	8,00	0,1730	0,50	11,68
2131	10,5	66,55	83,80	10,16			0,1743		
2132	11,5	66,28	83,62	10,09	1,92	8,17	0,1619	0,42	11,86
2133	12,5	64,60	82,59	10,02			0,1487		
2134	13,5	64,95	82,81	9,88	1,89	7,99	0,1480	0,46	12,77
2135	14,5	63,91	82,16	9,90			0,1479		
2136	15,5	62,97	81,55	10,19	1,75	8,44	0,1530	0,43	11,44
2137	16,5	62,37	81,17	10,17			0,1470		
2138	17,5	61,69	80,72	10,12	1,58	8,54	0,1383	0,43	11,42
2139	18,5	59,74	79,42	9,97			0,1320		
2140	19,5	59,83	79,48	9,90	1,36	8,54	0,1160	0,40	11,72
2141	20,5	57,54	77,89	9,90			0,1240		
2142	21,5	58,03	78,24	9,96	1,34	8,62	0,1070	0,35	12,52
2143	22,5	56,73	77,32	9,79			0,1094		
2144	23,5	56,38	77,07	9,74	1,22	8,32	0,1030	0,37	11,84
2145	24,5	54,77	75,89	9,61			0,0985		
2146	25,5	54,69	75,84	9,60	1,13	8,47	0,0930	0,35	12,15
2147	26,5	52,87	74,47	9,57			0,0915		
2148	27,5	51,48	73,39	9,47	1,04	8,43	0,0830	0,31	12,53
2149	28,5	51,69	73,56	9,19			0,0842		
2150	29,5	51,85	73,68	9,15	1,09	8,06	0,0740	0,35	14,73
2151	30,5	52,00	73,80						
2152	31,5	51,47	73,39	8,93	1,04	7,89	0,074	0,32	14,05
2153	32,5	52,53	74,21						
2154	33,5	53,00	74,57	9,02	1,02	8,00	0,087	0,37	11,72
2155	34,5	52,45	74,15						
2156	35,5	49,85	72,10	8,69	0,78	7,91	0,073	0,34	10,68
2157	36,5	50,80	72,86						
2158	37,5	52,31	74,04	9,20	0,92	8,28	0,082	0,36	11,22
2159	38,5	52,66	74,31						
2160	39,5	52,34	74,06	8,88	0,97	7,91	0,082	0,35	11,83
2161	40,5	53,17	74,70						
2162	41,5	53,56	74,99	9,09	0,91	8,18	0,080	0,36	11,38
2163	42,5	52,72	74,35						
2164	43,5	52,53	74,21	8,29	0,82	7,47	0,074	0,39	11,08
2165	44,5	51,44	73,36						
2166	45,5	51,36	73,30	8,01	0,84	7,17	0,084	0,36	10,00
2167	46,5	51,28	73,24						
2168	47,5	51,84	73,68	8,22	0,92	7,30	0,084	0,35	10,95
2169	48,5	52,42	74,12						
2170	49,5	51,71	73,57	8,01	0,95	7,06	0,091	0,33	10,44
2171	50,5	51,94	73,75						
2172	51,5	51,57	73,46	8,12	0,97	7,15	0,080	0,40	12,13
2173	52,5	51,42	73,35						
2174	53,5	52,67	74,32	7,86	1,01	6,85	0,080	0,41	12,63
2175	54,5	51,65	73,53						
2176	55,5	51,59	73,48	7,99	1,02	6,97	0,079	0,34	12,91
2177	56,5	52,60	74,26						
2178	57,5	52,56	74,23	8,10	0,96	7,14	0,093	0,40	10,32
2179	58,5	52,01	73,81						
2180	59,5	52,62	74,28	8,11	1,02	7,09	0,090	0,45	11,33
2181	60,5	52,43	74,13						
2182	61,5	52,14	73,91	7,94	1,05	6,89	0,081	0,40	12,96
2183	62,5	51,90	73,72						
2184	63,5	52,77	74,39	8,03	1,06	6,97	0,092	0,44	11,52
2185	64,5	52,01	73,81						
2186	65,5	52,45	74,15	7,86	1,01	6,85	0,091	0,43	11,10
2187	66,5	51,98	73,78						
2188	67,5	52,90	74,49	7,84	1,05	6,79	0,095	0,43	11,05
2189	68,5	52,64	74,29						
2190	69,5	52,61	74,27	7,69	1,02	6,67	0,099	0,46	10,30
2191	70,5	53,21	74,73						
2192	71,5	52,26	74,00	7,83	1,02	6,81	0,094	0,44	10,85
2193	72,5	52,46	74,15						
2194	73,5	52,69	74,33	7,70	0,97	6,73	0,090	0,40	10,74
2195	74,5	51,87	73,70						
2196	75,5	51,04	73,05	7,23	0,92	6,31	0,092	0,47	9,98
2197	76,5	51,54	73,44						
2198	77,5	53,38	74,86	7,64	1,16	6,48	0,104	0,52	11,11
2199	78,5	53,97	75,36						
2200	79,5	54,65	75,81	8,02	1,25	6,77	0,112	0,45	11,12
2201	80,5	55,31	76,29						
2202	81,5	54,72	75,85	7,92	1,21	6,71	0,117	0,51	10,14
2203	82,5	53,61	75,03						
2204	83,5	54,76	75,89	8,11	1,21	6,90	0,112	0,44	10,85
2205	84,5	53,75	75,13						
2206	85,5	52,39	74,10	7,68	1,14	6,54	0,091	0,43	12,55
2207	86,5	53,31	74,80						
2208	87,5	53,27	74,77	7,79	1,17	6,62	0,106	0,50	11,01
2209	88,5	53,84	75,20						
2210	89,5	54,31	75,53	7,60	1,17	6,43	0,118	0,47	9,89
2211	90,5	53,65	75,06						
2212	91,5	53,07	74,62	7,52	1,06	6,46	0,109	0,41	9,68
2213	92,5	52,51	74,19						
2214	93,5	52,47	74,16	7,35	1,08	6,36	0,098	0,49	11,05

Annexe 5.4. Paramètres physiques et teneur en C,H,N

C6

échantillon	prof (cm)	Ctot (%)	Ntot (%)	Htot (%)
C601	0.5	10.65	0.240	0.45
C603	2.5	10.36	0.203	0.38
C605	4.5	10.48	0.224	0.43
C607	7	10.54	0.209	0.41
C610	9.5	10.07	0.172	0.39
C612	11.5	7.21	0.118	0.30
C614	13.5	10.22	0.187	0.36
C615	15	10.00	0.164	0.37
C617	16.5	6.67	0.120	0.31
C618	17.5	10.51	0.155	0.34
C619	18.5	10.62	0.158	0.36
C621	20.5	10.49	0.129	0.26
C624	23.5	9.78	0.082	0.26
C627	26.5	9.54	0.076	0.24
C629	28.5	9.54	0.074	0.24
C631	30.5	9.41	0.084	0.26
C633	32.5	9.39	0.072	0.24
C635	34.5	9.31	0.071	0.22
C637	36.5	9.01	0.081	0.23
C639	38.5	9.33	0.079	0.25
C641	40.5	8.76	0.079	0.28
C645	44.5	8.61	0.072	0.26
C649	48.5	8.22	0.078	0.29
C653	52.5	8.48	0.089	0.29
C656	55.5	8.29	0.078	0.30
C659	58.5	8.20	0.092	0.30
C662	61.5	8.13	0.089	0.34
C665	64.5	8.01	0.084	0.30
C667	66.5	8.02	0.089	0.34
C669	68.5	7.96	0.090	0.34
C671	70.5	7.61	0.087	0.37
C673	72.5	7.18	0.075	0.32
C675	74.5	7.96	0.098	0.33
C678	77.5	7.74	0.112	0.40
C681	80.5	8.68	0.095	0.35

C7

échantillon	prof (cm)	Ctot (%)	Ntot (%)	Htot (%)
c705	0.5	9.69	0.157	0.39
c75	5	10.27	0.148	0.38
c79	9	10.02	0.162	0.39
c713	13	9.92	0.178	0.42
c717	17	9.53	0.171	0.45
c721	21	9.49	0.129	0.38
c724	24	9.87	0.153	0.39
c727	27	10.01	0.139	0.38
c730	30	10.10	0.181	0.42
c733	33	10.18	0.171	0.43
c736	36	9.86	0.164	0.40
c739	39	10.17	0.144	0.40
c741	41	10.42	0.121	0.32
c744	44	10.32	0.105	0.31
c747	47	9.58	0.079	0.29
c750	50	9.39	0.069	0.29
c753	53	9.13	0.082	0.31
c756	56	9.36	0.085	0.32
c759	59	8.36	0.071	0.34
c762	62	8.10	0.077	0.38
c765	65	8.23	0.089	0.36
c768	68	8.47	0.083	0.36
c771	71	8.27	0.090	0.38
c774	74	8.16	0.102	0.41
c7765	76.5	8.52	0.094	0.36

C7b

échantillon	prof (cm)	Ctot (%)	Corg (%)	Cmin (%)	Ntot (%)	Htot (%)
C7b01	0.5	10.23	2.80	7.43	0.238	0.48
C7b03	2.5	9.97			0.155	0.36
C7b05	4.5	9.80	2.12	7.67	0.143	0.36
C7b07	6.5	9.06	1.32	7.73	0.081	0.22
C7b09	8.5	8.36	1.35	7.01	0.110	0.33
C7b12	11.5	7.08	1.26	5.82	0.076	0.22
C7b18	17.5	7.82			0.080	0.31
C7b24	23.5	10.21	1.20	9.01	0.119	0.38
C7b26	25.5	9.36	1.20	8.16	0.076	0.27
C7b30	29.5	8.54			0.060	0.24
C7b34	33.5	8.57	1.13	7.44	0.067	0.27
C7b36	35.5	9.67			0.051	0.13
C7b40	39.5	9.58	1.19	8.39	0.067	0.19
C7b42	41.5	10.48	1.54	8.95	0.115	0.22
C7b44	43.5	9.86	1.24	8.62	0.089	0.24
C7b47	46.5	9.40			0.058	0.26
C7b50	49.5	9.16	0.96	8.20	0.066	0.24
C7b53	52.5	8.92			0.060	0.27
C7b56	55.5	8.61			0.069	0.31
C7b59	58.5	8.11	1.02	7.09	0.074	0.31
C7b62	61.5	8.86			0.074	0.32

Annexe 5.4. Paramètres physiques et teneur en C,H,N

C7c

échantillon	prof (cm)	Ctot (%)	Corg (%)	Cmin (%)	Ntot (%)	Htot (%)
C7c01	0.5	10.21	2.43	7.78	0.235	0.45
C7c05	4.5	10.29	2.18	8.11	0.199	0.45
C7c07	6.5	9.77			0.162	0.32
C7c09	8.5	8.94	1.64	7.30	0.103	0.28
C7c11	10.5	9.14	1.31	7.83	0.082	0.19
C7c12	12	9.91	1.89	8.03	0.153	0.33
C7c18	17.5	9.83			0.145	0.35
C7c23	22.5	10.14	1.95	8.19	0.152	0.32
C7c28	27.5	10.12			0.140	0.30
C7c33	32.5	9.99	1.93	8.06	0.152	0.32
C7c38	37.5	10.09			0.144	0.34
C7c43	42.5	9.91	1.90	8.01	0.150	0.32
C7c47	46.5	10.37	2.20	8.17	0.172	0.37
C7c48	47.5	10.18			0.148	0.34
C7c49	48.5	10.23			0.118	0.31
C7c52	51.5	9.56	1.14	8.42	0.076	0.20
C7c54	53.5	8.89			0.068	0.23
C7c56	55.5	9.22	1.01	8.21	0.066	0.23
C7c58	57.5	9.25			0.076	0.26
C7c60	59.5	9.23			0.070	0.28
C7c61	61	9.11	1.18	7.93	0.077	0.24

C8

échantillon	prof (cm)	H2O (%)	Poro (%)	Ctot (%)	Ntot (%)	Htot (%)
c801	1	61.2	80.40	9.96	0.220	0.48
c8055	5.5			9.27	0.166	0.37
c811	11	62.3	81.12	10.02	0.160	0.50
c8135	13.5			9.86	0.173	0.44
c816	16	58.8	78.77	9.38	0.170	0.50
c818	18			10.02	0.129	0.42
c820	20	58	78.22	10.26	0.140	0.37
c822	22			10.26	0.115	0.30
c824	24			9.74	0.098	0.33
c8255	25.5			9.60	0.085	0.43
c827	27	50.4	72.54	9.58	0.100	0.30
c8295	29.5			9.11	0.092	0.26
c832	32	50	72.22	9.11	0.100	0.31
c834	34			9.23	0.078	0.29
c836	36	49.5	71.82	9.01	0.100	0.29
c838	38			8.87	0.079	0.30
c840	40			8.34	0.080	0.31
c8415	41.5			8.76	0.070	0.27
c843	43	49.1	71.49	8.50	0.090	0.33
c846	46			8.80	0.084	0.30
c850	50			8.38	0.076	0.29
c854	54	49.5	71.82	8.41	0.090	0.34
c857	57			8.18	0.090	0.34
c860	60			7.83	0.079	0.35
c863	63			8.74	0.101	0.37
c866	66	50.2	72.38	8.55	0.101	0.39
c8685	68.5			8.22	0.090	0.37

Annexe 5.4. Paramètres physiques et teneur en C,H,N

C9

échantillon	prof (cm)	H2O (%)	Poro (%)	Ctot (%)	Ntot (%)	Htot (%)
c901	1	69	85.27	11.08	0.230	0.44
c9035	3.5	68.4	84.91	11.08	0.220	0.37
c906	6	67.8	84.55	11.38	0.190	0.41
c909	9	68.4	84.91	10.98	0.180	0.39
c912	12	68.9	85.21	10.78	0.170	0.38
c915	15	64	82.21	10.68	0.130	0.31
c9165	16.5			10.74	0.138	0.35
c918	18	59.1	78.98	10.68	0.120	0.26
c9195	19.5			10.46	0.097	0.27
c921	21	56	76.79	10.28	0.090	0.25
c924	24	53.2	74.72	9.91	0.080	0.23
c927	27	53.7	75.10	9.70	0.080	0.31
c9295	29.5	54.2	75.47	9.90	0.080	0.30
c9315	31.5			9.62	0.080	0.30
c9335	33.5	55.4	76.36	9.07	0.070	0.32
c937	37			8.71	0.084	0.35
c941	41	54.3	75.55	9.03	0.070	0.31
c9445	44.5			8.75	0.082	0.34
c9475	47.5			8.72	0.081	0.37
c951	51	55.4	76.36	8.49	0.100	0.40
c954	54			8.42	0.085	0.32
c957	57			7.78	0.094	0.44
c961	61	56.8	77.37	8.83	0.110	0.38
c964	64			8.67	0.116	0.41
c967	67			8.09	0.095	0.45
c970	70	56.8	77.37	8.49	0.100	0.38
c973	73			7.82	0.108	0.48
c977	77			7.32	0.108	0.49
c980	80	57.8	78.08	8.31	0.100	0.42

C13

échantillon	prof (cm)	H2O (%)	Poro (%)	Ctot (%)	Ntot (%)	Htot (%)
c1301	1	57.1	72.58	9.67	0.180	0.46
c1305	5			9.69	0.163	0.41
c1310	10	54.5	75.69	9.45	0.160	0.38
c1313	13	63.9	82.15	10.61	0.210	0.47
c1318	18	64.3	82.40	9.96	0.150	0.39
c13215	21.5			9.91	0.142	0.40
c1325	25	61.3	80.46	10.06	0.160	0.46
c13275	27.5			9.92	0.129	0.29
c1330	30	56	76.79	10.03	0.130	0.35
c1332	32			9.93	0.113	0.34
c1334	34			9.61	0.108	0.33
c13355	35.5			9.00	0.085	0.31
c1337	37	46.6	69.41	9.06	0.090	0.30
c1341	41			8.62	0.086	0.34
c1346	46	48.7	71.17	8.96	0.100	0.35
c1352	52			9.01	0.085	0.35
c1357	57	48.9	71.33	9.23	0.100	0.31
c1359	59			8.07	0.078	0.38
c1361	61			8.36	0.091	0.33
c1363	63			8.00	0.087	0.41
c1365	65			7.89	0.085	0.44
c1367	67	50.3	72.46	8.22	0.090	0.35
c1371	71			8.51	0.085	0.38
c1375	75			8.16	0.095	0.40
c1379	79	50	72.22	8.25	0.090	0.42

Annexe 5.4. Paramètres physiques et teneur en C,H,N

C15

échantillon	prof (cm)	Ctot (%)	Ntot (%)	Htot (%)
C15001	0.5	10.76	0.253	0.52
C15002	1.5	10.77	0.283	0.60
C15003	2.5	10.63	0.212	0.53
C15004	3.5	10.51	0.210	0.52
C15005	4.5	9.36	0.160	0.45
C15006	5.5	9.31	0.161	0.37
C15007	6.5	10.54	0.175	0.45
C15008	7.5	10.53	0.173	0.38
C15009	8.5	10.18	0.152	0.35
C15010	9.5	10.27	0.140	0.36
C15011	10.5	4.55	0.034	0.15
C15012	11.5	10.66	0.122	0.26
C15013	12.5	10.66	0.117	0.36
C15014	13.5	10.30	0.099	0.27
C15015	14.5	10.11	0.092	0.29
C15016	15.5	8.90	0.078	0.25
C15017	16.5	9.96	0.106	0.29
C15018	17.5	10.22	0.098	0.30
C15019	18.5	9.81	0.073	0.27
C15020	19.5	9.85	0.095	0.31
C15021	20.5	9.58	0.093	0.32
C15022	21.5	9.62	0.073	0.29
C15023	22.5	9.45	0.088	0.34
C15024	23.5	9.77	0.094	0.32
C15025	24.5	9.63	0.070	0.27
C15026	25.5	9.70	0.094	0.32
C15027	26.5	9.02	0.091	0.36
C15028	27.5	8.90	0.074	0.31
C15029	28.5	9.13	0.101	0.35
C15030	29.5	8.85	0.096	0.38
C15031	30.5	8.80	0.074	0.24
C15032	31.5	8.67	0.098	0.38
C15033	32.5	8.71	0.141	0.38
C15034	33.5	8.83	0.081	0.35
C15035	34.5	9.02	0.104	0.39
C15036	35.5	8.66	0.104	0.40
C15037	36.5	8.78	0.080	0.34
C15038	37.5	8.58	0.110	0.42
C15039	38.5	8.77	0.106	0.35
C15040	39.5	8.69	0.087	0.38
C15041	40.5	8.71	0.110	0.42
C15042	41.5	8.53	0.129	0.44
C15043	42.5	8.30	0.088	0.39
C15044	43.5	8.65	0.109	0.38
C15045	44.5	8.67	0.110	0.41
C15046	45.5	8.48	0.084	0.37
C15047	46.5	8.20	0.112	0.40
C15048	47.5	7.81	0.119	0.49
C15049	48.5	8.48	0.099	0.43
C15050	49.5	8.92	0.134	0.45
C15051	50.5	8.84	0.123	0.44
C15052	51.5	8.66	0.100	0.44
C15053	52.5	8.85	0.138	0.45
C15054	53.5	8.43	0.121	0.46
C15055	54.5	8.27	0.099	0.47
C15056	55.5	8.43	0.122	0.46
C15057	56.5	8.18	0.120	0.48
C15058	57.5	7.73	0.097	0.44
C15059	58.5	7.69	0.122	0.52
C15060	59.5	7.11	0.126	0.54
C15061	60.5	7.20	0.122	0.54
C15062	61.5	7.41	0.125	0.54
C15063	62.5	8.19	0.132	0.45
C15064	63.5	8.47	0.118	0.43
C15065	64.5	9.15	0.112	0.38
C15066	65.5	9.43	0.110	0.37
C15067	66.5	8.93	0.108	0.42
C15068	67.5	9.13	0.118	0.41
C15069	68.5	9.04	0.119	0.39
C15070	69.5	9.18	0.107	0.36
C15071	70.5	9.27	0.098	0.33

C18

échantillon	prof (cm)	Ctot (%)	Ntot (%)	Htot (%)
18g1	1	10.40	0.22	0.35
18g2	2.5	10.50	0.16	0.33
18g4	4	10.40	0.09	0.23
18g5	5.5	9.89	0.07	0.26
18g6	6.8	9.35	0.07	0.28
18g7	7	9.47	0.09	0.28
18g8	8	9.21	0.06	0.29
18g9	9	9.12	0.06	0.27
18g10	10.3	8.32	0.06	0.31
18g11	11	8.14	0.06	0.36
18g12	11.7	8.27	0.06	0.33
18g13	13	8.12	0.07	0.34
18g14	14	8.16	0.07	0.38
18g15	15	7.00	0.06	0.28
18g16	16.3	7.84	0.08	0.36
18g17	17.3	8.31	0.06	0.26
18g18	17.8	10.20	0.04	0.21
18g19	18.8	10.30	0.05	0.23
18g20	20	10.30	0.04	0.23
18g21	21.5	10.20	0.04	0.24
18g23	23	9.88	0.05	0.28
18g24	24.5	9.11	0.06	0.31
18g26	26	8.88	0.06	0.34
18g27	27.5	9.61	0.05	0.29
18g28	28.3	9.98	0.05	0.28
18g30	30	9.92	0.06	0.29
18g31	31.5	10.40	0.05	0.25
18g33	33	10.40	0.05	0.25
18g34	33.9	10.30	0.06	0.30
18g35	35.6	10.60	0.05	0.24
18g36	37	10.30	0.05	0.27
18g38	38.5	9.75	0.06	0.31
18g40	40.2	10.60	0.06	0.28
18g42	41.9	11.10	0.06	0.26
18g43	42.6	11.00	0.06	0.25
18g44	44.2	10.90	0.06	0.24
18g46	45.8	10.60	0.06	0.26
18g47	47	9.69	0.06	0.31
18g48	48.75	9.99	0.06	0.27
18g50	50.5	11.40	0.06	0.29
18g52	52	10.40	0.05	0.23
18g54	54	10.20	0.05	0.25
18g55	56	9.87	0.05	0.28
18g56	57.3	9.85	0.05	0.30
18g57	57.8	9.82	0.05	0.29
18g58	58.7	9.96	0.06	0.29
18g59	59.4	9.72	0.06	0.26
18g60	59.9	9.21	0.05	0.31

Annexe 5.4. Paramètres physiques et teneur en C,H,N

C19

échantillon	prof (cm)	Ctot (%)	Ntot (%)	Htot (%)
191	0.5	9.84	0.192	0.41
192	1.5	10.37	0.223	0.45
193	2.5	10.15	0.23	0.51
194	3.5	10.27	0.24	0.49
195	4.5	10.23	0.212	0.50
196	5.5	10.67	0.201	0.40
197	6.5	10.37	0.191	0.46
198	7.5	10.29	0.183	0.45
199	8.5	10.28	0.15	0.34
1910	9.5	10.01	0.151	0.34
1911	10.5	10.21	0.131	0.32
1912	11.5	10.19	0.122	0.28
1913	12.5	10.21	0.104	0.27
1914	13.5	9.94	0.117	0.32
1915	14.5	9.95	0.095	0.27
1916	15.5	10.01	0.089	0.25
1917	16.5	9.94	0.089	0.28
1918	17.5	10.01	0.082	0.24
1919	18.5	9.50	0.066	0.26
1920	19.5	9.08	0.061	0.24
1921	20.5	9.00	0.061	0.29
1922	21.5	8.88	0.062	0.28
1923	22.5	9.01	0.075	0.28
1924	23.5	9.29	0.066	0.23
1925	24.5	8.93	0.059	0.25
1926	25.5	9.03	0.062	0.27
1927	26.5	9.06	0.058	0.22
1928	27.5	8.91	0.057	0.26
1929	28.5	8.68	0.052	0.28
1930	29.5	8.33	0.062	0.33
1931	30.5	8.16	0.061	0.29
1932	31.5	8.03	0.057	0.24
1933	32.5	7.96	0.052	0.26
1934	33.5	7.55	0.059	0.31
1935	34.5	7.63	0.064	0.36
1936	35.5	8.01	0.058	0.30
1937	36.5	8.19	0.064	0.35
1938	37.5	8.07	0.064	0.32
1939	38.5	7.89	0.061	0.33
1940	39.5	7.81	0.062	0.34
1941	40.5	7.77	0.066	0.32
1942	41.5	8.04	0.066	0.34
1943	42.5	7.96	0.061	0.34
1944	43.5	7.90	0.068	0.38
1945	44.5	7.90	0.07	0.40
1946	45.5	8.25	0.076	0.35
1947	46.5	7.74	0.072	0.40
1948	47.5	7.44	0.068	0.39
1949	48.5	7.46	0.077	0.41
1950	49.5	7.81	0.078	0.34
1951	50.5	7.82	0.086	0.43
1952	51.5	8.65	0.089	0.44
1953	52.5	8.01	0.088	0.41
1954	53.5	8.01	0.089	0.40
1955	54.5	7.70	0.084	0.40
1956	55.5	8.03	0.085	0.38
1957	56.5	8.06	0.086	0.40
1958	57.5	7.64	0.083	0.43
1959	58.5	7.81	0.092	0.43
1960	59.5	7.67	0.083	0.42
1961	60.5	7.23	0.085	0.45
1962	61.5	6.99	0.082	0.44
1963	62.5	6.91	0.085	0.48
1964	63.5	6.75	0.085	0.44
1965	64.5	6.27	0.084	0.49
1966	65.5	6.52	0.087	0.49
1967	66.5	6.84	0.086	0.49
1968	67.5	6.77	0.088	0.51
1969	68.5	7.07	0.099	0.48
1970	69.5	7.58	0.098	0.44
1971	70.5	8.12	0.081	0.36
1972	71.5	8.70	0.072	0.33
1973	72.5	8.56	0.082	0.39
1974	73.5	9.19	0.092	0.34
1975	74.5	8.85	0.097	0.39
1976	75.5	8.59	0.082	0.35
1977	76.5	8.55	0.079	0.37
1978	77.5	8.95	0.073	0.35
1979	78.5	9.05	0.074	0.35

C20

échantillon	prof (cm)	Ctot (%)	Ntot (%)	Htot (%)
C2001	0.5	10.32	0.265	0.54
C2005	4.5	10.54	0.225	0.44
C2009	8.5	11.20	0.215	0.41
C2011	10.5	11.01	0.205	0.38
C2013	12.5	10.56	0.184	0.39
C2015	14.5	10.38	0.154	0.39
C2017	16.5	10.26	0.148	0.34
C2020	19.5	9.96	0.119	0.27
C2023	22.5	9.85	0.099	0.25
C2026	25.5	9.78	0.084	0.23
C2029	28.5	9.29	0.070	0.23
C2032	31.5	8.81	0.073	0.26
C2034	33.5	9.08	0.060	0.15
C2036	35.5	8.95	0.063	0.24
C2038	37.5	8.45	0.058	0.22
C2040	39.5	9.14	0.076	0.23
C2042	41.5	9.23	0.073	0.25
C2044	43.5	8.48	0.071	0.29
C2046	45.5	8.58	0.063	0.27
C2049	48.5	8.08	0.059	0.24
C2052	51.5	8.07	0.072	0.25
C2054	53.5	7.74	0.076	0.33
C2056	55.5	7.65	0.070	0.33
C2058	58	8.20	0.067	0.29
C2061	60.5	7.72	0.077	0.33

C23

échantillon	prof (cm)	Ctot (%)	Ntot (%)	Htot (%)
C2301	0.5	9.834	0.513	0.21
C2304	3.5	10.017	0.537	0.216
C2307	6.5	10.495	0.444	0.185
C2309	8.5	10.459	0.463	0.193
C2311	10.5	10.221	0.431	0.172
C2313	12.5	9.7935	0.3907	0.1658
C2315	14.5	9.3713	0.3196	0.1268
C2317	16.5	9.2793	0.3103	0.0912
C2319	18.5	8.7014	0.2973	0.0705
C2321	20.5	8.4555	0.35	0.0898
C2323	22.5	8.1533	0.2906	0.0697
C2325	24.5	8.573	0.2803	0.0846
C2327	26.5	8.3381	0.2785	0.0748
C2330	29.5	7.134	0.3149	0.0637
C2333	32.5	7.7138	0.3207	0.0781
C2336	35.5	6.9756	0.3713	0.0767
C2339	38.5	6.5017	0.3375	0.073
C2342	41.5	7.1769	0.3778	0.0849
C2345	44.5	7.4386	0.3325	0.084
C2348	47.5	7.052	0.3936	0.0805
C2351	50.5	7.4513	0.3521	0.0929
C2354	53.5	7.1157	0.4337	0.1014
C2356	55.5	7.7867	0.3548	0.1033
C2358	57.5	7.4499	0.4134	0.0932
C2360	59.5	7.1848	0.4369	0.1013
C2362	61.5	6.9368	0.402	0.1044
C2364	63.5	7.312	0.3916	0.1052
C2366	65.5	7.4941	0.4421	0.1095
C2368	67.5	7.6314	0.3921	0.1178

Annexe 5.5. Composition des laminations claires et foncées

échantillon	Ctot (%)	Corg (%)	Ntot (%)	Cmin (%)	Carb (%)
c20-14.5cm	9.56	1.31	0.19	8.24	68.75
c14	10.77	1.32	0.10	9.45	78.82
c15	10.54	2.10	0.29	8.44	70.40
c23-17cm	9.43	1.49	0.19	7.95	66.26
c18-7cm	9.48	0.60	0.07	8.88	74.06
Lamines foncées	9.96	1.36	0.17	8.59	71.66
c20-14.5cm	9.28	1.16	0.16	8.12	67.74
c14	10.41	0.85	0.14	9.56	79.71
c15	10.14	1.03	0.14	9.11	75.98
c23-17cm	9.20	1.09	0.13	8.11	67.60
c18-6.8cm	9.35	0.62	0.06	8.73	72.81
Lamines claires	9.68	0.95	0.12	8.72	72.77

Annexe 5.6. Variation spatiale de la composition du sédiment de surface (0-1cm de profondeur)

échantillon	Ctot (%)	Ntot (%)	Corg (%)	Cmin (%)	Carb (%)	C/N
C6	10.65	0.24	2.60	8.04	67.09	10.84
C7	9.69	0.16	1.76	7.93	66.14	11.20
C8	10.01	0.18	2.23	7.77	64.83	12.47
C9	10.90	0.23	2.11	8.79	73.29	9.18
C11	11.12	0.25	2.21	8.91	74.32	9.03
C12	9.67	0.16	1.73	7.94	66.22	10.64
C13	9.56	0.18	2.13	7.43	62.00	11.81
C15	10.76	0.25	2.05	8.71	72.67	8.09
C16	10.92	0.21	1.97	8.95	74.67	9.36
C17	12.20	0.22	1.87	10.34	86.20	8.57
C18	10.20	0.24	1.85	8.35	69.64	7.71
C19	10.90	0.23	2.47	8.43	70.27	10.76
C19c	10.50	0.24	2.57	7.93	66.16	10.56
C20	10.32	0.27	2.97	7.35	61.30	11.21
C21	9.89	0.16	1.74	8.14	67.90	11.12
C23	9.83	0.21	2.18	7.65	63.83	10.37
C37	10.37	0.27	2.67	7.70	64.25	10.04
Moyen	12.49	0.09	1.32	11.17	93.18	14.76
bassin NW	10.02	0.23	2.49	7.54	62.84	10.86
bassin SE	10.77	0.24	2.30	8.46	70.60	9.65
bassin de Ntel	10.17	0.20	2.18	7.99	66.62	11.02
tombant NW	9.85	0.17	1.90	7.95	66.32	11.41
tombant SE	10.56	0.23	1.91	8.65	72.15	8.53
beine	11.94	0.18	1.80	10.14	84.56	10.78

Annexe 5.7. Variation spatiale de la composition du sédiment de l'intervalle L1

échantillon	Ctot (%)	Ntot (%)	Corg (%)	Cmin (%)	Carb (%)	C/N
C6c	10.19	0.19	2.37	7.82	65.14	12.73
C7	10.06	0.17	2.08	7.98	66.47	12.30
C7b	9.96	0.19	2.19	7.77	64.76	11.63
C7c	10.11	0.16	2.01	8.10	67.46	12.68
C8	9.78	0.18	2.32	7.46	62.12	12.98
C9	10.95	0.17	2.14	8.81	73.37	12.83
C13	9.73	0.18	2.09	7.64	63.62	11.75
C15	10.14	0.17	1.91	8.23	68.57	11.49
C19	10.51	0.17	1.95	8.56	71.29	11.29
C20b	10.43	0.18	2.14	8.30	69.11	12.08
C23	10.03	0.22	2.23	7.81	65.03	10.31
C37	10.20	0.19	2.04	8.16	67.99	10.85

Annexe 5.8. Minéralogie sédiment total des carottes courtes (coups par minute)

C19c										
échantillon	profondeur (cm)	phyllo	quartz	feld-k	plagio	calcite	dolomite	ankérite	A+12(A+D)+Cc	%Cc allochtone
c19c01	0,5	3420	31123	1020	2940	238540	1860	1260	0,0087	10,5
c19c03	2,5	2760	29397	2100	3180	253510	1860	960	0,0074	8,9
c19c05	4,5	2040	28523	1800	3000	260695	1800	900	0,0099	8,3
c19c07	6,5	2460	27408	1440	3080	278674	1320	900	0,0056	6,7
c19c09	8,5	3080	23972	900	2520	239813	2380	2520	0,0022	14,9
c19c11	10,5	1920	36147	1320	2640	236376	1500	900	0,0070	8,5
c19c13	14,5	2880	36249	1200	1500	244480	2700	1020	0,0100	12,2
c19c15	18,5	3360	45991	1740	4980	230485	1800	1800	0,0103	12,6
c19c17	22,5	2820	41689	1360	4920	182898	1500	900	0,0087	10,5
c19c19	26,5	3000	44941	720	5340	234483	1920	1200	0,0088	10,7
c19c21	30,5	3780	50405	1500	4380	202650	2100	900	0,0098	11,9
c19c23	34,5	3060	49379	2280	6360	224125	2100	960	0,0090	11,0
c19c25	38,5	4380	47655	2340	5880	219777	2400	1500	0,0117	14,3
c19c27	42,5	5520	60888	1680	7140	184034	2100	2100	0,0150	18,3
c19c29	46,5	2880	40620	1560	3720	249329	2400	1680	0,0106	13,1
c19c31	50,5	3180	41895	1380	4800	237584	1800	660	0,0071	8,6
c19c33	54,5	3420	42368	1020	3060	262162	1860	1620	0,0088	10,7
c19c35	58,5	2820	35792	1380	4020	230521	2400	900	0,0095	11,5
c19c37	62,5	3300	35621	1620	3765	244517	1800	1200	0,0085	7,9
c19c39	66,5	3240	36469	1140	4560	235142	2100	1440	0,0099	12,1
c19c41	70,5	2800	44019	1200	5760	206017	1800	900	0,0088	10,7
c19c43	74,5	2820	33330	1200	4680	264130	1500	1080	0,0065	7,8
c19c45	78,5	1440	15520	600	1920	280644	340	960	0,0011	5,2
c19c47	80,5	1500	22551	1200	2880	309913	1380	1200	0,0057	6,9
C37										
échantillon	profondeur (cm)	phyllo	quartz	feld-k	plagio	calcite	dolomite	ankérite	A+12(A+D)+Cc	%Cc allochtone
c3701	0,5	3360	33988	840	2832	227361	2340	1080	0,0099	12,1
c3703	4,5	2760	34389	1320	3105	238121	3060	1020	0,0113	13,8
c3705	8,5	3300	37444	1560	2970	249030	3480	2460	0,0157	19,2
c3707	12,5	3780	43998	5240	2760	262624	2820	1620	0,0111	13,6
c3709	16,5	2340	33528	1140	2940	253475	1200	2100	0,0086	10,5
c3711	20,5	2100	41444	1500	2100	238582	1080	900	0,0055	6,7
c3713	24,5	2700	40486	700	5580	261330	1680	5600	0,0133	16,2
c3715	28,5	2280	41346	900	2937	247281	2640	2220	0,0029	15,8
c3717	32,5	2640	47302	1440	3300	236574	2100	2100	0,0117	14,3
c3719	36,5	2760	47644	1140	3867	242841	1320	2340	0,0100	12,1
c3721	40,5	2820	38382	1680	3106	222484	2100	2340	0,0131	16,0
c3723	44,5	3340	35819	4157	3779	219381	2340	3600	0,0177	21,8
c3725	48,5	3680	47618	5730	5546	202738	2220	3000	0,0169	20,7
c3727	52,5	3840	55804	2400	5990	229968	2520	1320	0,0110	13,3
c3729	56,5	3660	50893	2100	4829	234832	1740	2220	0,0011	13,6
c3731	60,5	3720	54941	3120	6459	217727	3900	2100	0,0180	22,1
c3733	64,5	3600	53149	2100	5904	225273	3480	1500	0,0141	17,2
c3735	68,5	3720	46197	1440	4283	186207	2220	1500	0,0132	16,2
c3737	72,5	3300	57527	1800	5327	214450	2640	1860	0,0135	16,6
c3739	76,5	4260	53187	1320	5218	193251	2340	1560	0,0133	16,2
c3741	80,5	3240	59491	1620	4965	208575	3060	2460	0,0170	20,8
c3743	84,5	4420	60212	1380	7823	217858	3480	2200	0,0186	22,8
c3745	88,5	4320	53638	2940	4482	203499	2340	1980	0,0144	17,6
c3747	92,5	4200	65278	2400	8188	221701	2940	1800	0,0141	17,2
C6										
échantillon	profondeur (cm)	phyllo	quartz	feld-k	plagio	calcite	dolomite	ankérite	A+12(A+D)+Cc	%Cc allochtone
c601	2,5	1220	21677	960	3272	184369	1680	720	0,0086	10,5
c603	6,5	1440	36354	1020	2895	218009	1680	1020	0,0087	10,0
c605	9,5	2840	27737	1020	3792	195152	1620	540	0,0073	8,9
c607	13,5	1980	35016	900	4164	217801	3040	1260	0,0101	12,3
c609	17,5	1980	44589	1440	4720	187832	2440	1800	0,0148	18,1
c611	21,5	3100	43352	1020	4837	198333	2160	1200	0,0112	13,6
c613	25,5	2280	47533	1320	4223	189606	1740	900	0,0075	9,2
c615	29,5	2280	34473	1140	4864	188016	1980	2340	0,0151	18,5
c617	33,5	2260	44660	1020	4602	193938	2100	1260	0,0113	13,8
c619	37,5	2140	53366	1060	4913	189662	1800	1020	0,0100	12,2
c621	41,5	2840	37659	1200	6527	173381	3000	1800	0,0177	21,7
c623	45,5	2620	33442	1020	3103	183050	2700	3240	0,0212	26,1
C8										
échantillon	profondeur (cm)	phyllo	quartz	feld-k	plagio	calcite	dolomite	ankérite	A+12(A+D)+Cc	%Cc allochtone
c801	11,5	1680	52320	1800	5024	196583	1300	5150	0,0285	35,4
c811	10,5	1440	53342	900	3765	193945	2320	1600	0,0146	17,9
c816	15,5	1380	38664	4947	4175	199676	2220	1800	0,0132	16,2
c820	19,5	1320	44733	900	3142	217491	2160	900	0,0094	11,3
c824	23,5	1380	43570	900	4293	229892	2520	1320	0,0116	14,1
c828	27,5	1620	67767	1200	3257	196468	2520	1920	0,0148	18,2
c836	35,5	1620	47776	1020	5369	213819	3600	5800	0,0285	35,3
c843	42,5	1980	51271	720	5852	186021	4850	5450	0,0356	44,5
c844	51,5	1800	53280	780	10351	196990	2220	2520	0,0158	19,3
c846	65,5	2040	50936	960	4275	195588	2440	1800	0,0143	17,5
C9										
échantillon	profondeur (cm)	phyllo	quartz	feld-k	plagio	calcite	dolomite	ankérite	A+12(A+D)+Cc	%Cc allochtone
c901	0,5	1240	24308	600	2160	233225	1640	600	0,0084	7,8
c903	3	1380	23144	540	2196	233431	1620	600	0,0063	7,6
c906	5,5	1380	21266	1200	1620	232052	960	960	0,0055	6,6
c909	8,5	1440	22457	600	1680	234589	1500	660	0,0061	7,4
c912	11,5	1800	22518	600	1800	240284	900	540	0,0040	4,8
c915	14,5	1200	21487	780	1300	239494	1080	780	0,0052	6,2
c918	17,5	1200	22583	480	1680	245535	1020	600	0,0044	5,3
c921	20,5	1500	23950	840	2100	253689	1020	600	0,0042	5,1
c924	23,5	1620	18251	600	1680	168525	1560	1560	0,0122	14,9
c927	26,5	2160	27388	900	2303	222629	1500	1080	0,0077	9,3
c929	29	1620	36447	780	2040	242670	960	1440	0,0066	7,9
c933	33	2100	34242	840	2605	207783	1200	1740	0,0093	11,4
c937	40,5	1680	28861	1140	3398	212482	1200	1300	0,0076	9,5
c941	46,5	2417	46699	1800	5242	201718	1800	1360	0,0104	12,7
c946	60,5	2637	32896	900	2428	205385	1560	1440	0,0090	11,7
c950	66,5	2424	33176	900	3151	191504	1560	900	0,0081	11,0
c952	79,5	2907	26756	900	2931	154103	1740	0	0,0025	9,1
C13										
échantillon	profondeur (cm)	phyllo	quartz	feld-k	plagio	calcite	dolomite	ankérite	A+12(A+D)+Cc	%Cc allochtone
c1301	0,5	1620	66994	1680	2789	216295	2700	2100	0,0145	18,1
c1310	9,5	1440	63257	540	4560	231004	3480	1740	0,0148	18,1
c1314	12,5	1620	44178	540	3094	240958	1620	1620	0,0086	10,5
c1318	17,5	1740	46980	780	2160	231266	1980	3300	0,0150	18,3
c1325	24,5	1680	46033	660	3214	261981	1680	1260	0,0074	9,0
c1330	29,5	1680	58124	1560	3320	254875	1320	1800	0,0082	10,0
c1337	36,5	1680	67921	2100	3184	233781	2520	2760	0,0148	18,2
c1346	45,5	2100	63893	1440	4344	231016	2340	4200	0,0125	22,7
c1352	56,5	2660	57149	720	3844	219149	2160	3560	0,0165	20,2
c1357	66,5	2640	58104	5909	7111	222302	2640	1140	0,0098	11,9
c1359	78,5	2220	56100	2583	3423	217641	2300	1500	0,0118	14,4

Annexe 5.8. Minéralogie sédiment total des carottes courtes (coups par minute)

C18										
échantillon	profondeur (cm)	phyllo	quartz	feld-k	plagio	calcite	dolomite	ankérite	A+HA+D+Ce	%C allochthone
18g1	1	1380	54614	2855	10205	228544	2080	1260	0.0096	11.7
18g2	2.5	1880	27479	780	3057	241617	1300	960	0.0067	8.2
18g4	4	1380	23542	680	2656	251762	1200	840	0.0054	6.5
18g5	5.5	1620	28533	1080	4371	252660	900	420	0.0035	4.2
18g6	6.8	2040	29884	580	3149	241668	780	360	0.0032	3.9
18g7	7	1880	23833	1687	2722	217117	1120	510	0.0046	5.8
18g8	8	1880	31333	1440	2897	226140	1260	480	0.0051	6.2
18g9	9	1680	29768	680	3436	239269	2220	300	0.0074	9.0
18g10	10.3	2220	34950	780	3541	185369	900	360	0.0045	5.5
18g11	11	2220	39506	1020	4580	197461	720	900	0.0054	6.6
18g12	11.7	2364	31867	680	3740	186521	900	480	0.0049	5.9
18g13	13	2354	36924	1020	3466	186123	340	420	0.0045	5.4
18g14	14	2359	39935	1200	3315	190125	600	360	0.0033	4.0
18g15	15	2261	41380	960	3641	208071	780	540	0.0042	5.1
18g16	16.3	2540	38760	1380	3721	189496	480	300	0.0029	3.6
18g17	17.3	1440	35066	1260	3444	207724	480	360	0.0032	3.9
18g18	17.8	1320	18233	420	3703	251941	680	360	0.0037	4.5
18g19	18.8	1380	14953	1020	1488	251513	680	360	0.0027	3.3
18g20	20	1380	16938	540	1320	245547	680	360	0.0026	3.1
18g21	21.5	1320	19044	1260	2250	255991	580	420	0.0034	4.0
18g22	23	1440	23040	680	1808	239349	640	360	0.0033	4.0
18g24	24.5	2160	28853	720	3700	233622	960	360	0.0038	4.5
18g26	26	2040	29921	1080	2877	216750	680	360	0.0029	3.6
18g27	27.5	1320	22287	480	1808	230495	680	360	0.0028	3.3
18g28	28.3	1360	18660	540	2160	221460	540	360	0.0027	3.3
18g30	30	1620	21665	720	2436	234891	1080	360	0.0041	4.9
18g31	31.5	1380	16954	320	1560	241308	680	680	0.0033	4.0
18g33	33	1380	20187	680	1580	240081	680	470	0.0031	3.8
18g34	33.9	1620	19784	1140	1620	239630	2425	360	0.0022	2.7
18g35	35.6	1380	16247	540	1808	250293	680	360	0.0026	3.1
18g36	37	1360	21807	1020	2379	241763	540	360	0.0025	3.0
18g38	38.5	1740	22980	1380	2686	231713	1440	360	0.0029	3.6
18g40	40.2	1320	19591	1500	2280	251174	480	360	0.0027	3.3
18g42	41.9	200	15893	480	1680	249159	640	360	0.0034	4.0
18g43	42.6	1260	12025	540	1680	238637	1020	360	0.0039	4.7
18g44	46.2	1360	18322	900	1380	251133	720	360	0.0030	3.6
18g46	48.8	1440	23968	680	2360	255158	1380	360	0.0051	6.2
18g47	47	1430	21312	540	2387	255298	720	360	0.0029	3.5
18g48	48.75	1320	17349	680	2330	255040	720	360	0.0029	3.5
18g50	50.8	1020	18029	480	2344	249066	420	360	0.0021	2.6
18g52	52	1260	26167	900	2720	237176	2160	680	0.0075	9.1
18g54	54	1440	17409	480	1360	193066	1440	680	0.0060	7.2
18g55	56	1620	21763	780	2579	226873	680	360	0.0045	5.4
18g56	57.5	1920	22981	420	2400	227649	840	360	0.0034	4.1
18g57	57.8	1560	24790	720	2805	233019	1260	360	0.0046	5.6
18g58	58.7	1480	25183	660	2293	246512	1080	360	0.0039	4.7
18g59	59.4	1740	23610	680	2782	225246	1320	360	0.0050	6.0
18g60	59.9	1800	19885	720	3491	231145	900	360	0.0036	4.4
C19										
échantillon	profondeur (cm)	phyllo	quartz	feld-k	plagio	calcite	dolomite	ankérite	A+HA+D+Ce	%C allochthone
c190	0.5	1920	28495	660	2443	256027	1620	660	0.0059	7.2
c1905	4.3	1560	22219	660	3043	239639	1620	1220	0.0083	10.1
c1910	9.5	1500	28902	900	2640	290479	1680	2780	0.0109	13.3
c1915	14.5	1980	29804	5389	2538	277672	1440	640	0.0086	6.3
c1920	19.5	1740	37695	660	2603	246444	1740	960	0.0073	8.8
c1925	24.5	2220	33544	540	2641	245008	2160	1080	0.0067	10.6
c1930	29.5	2220	48179	1120	3683	235670	1680	660	0.0062	7.7
c1933	34.3	2430	54027.5	960	3980	226147	1620	680	0.0065	7.9
c1938	39.5	3340	49125	960	4999	236790	1520	660	0.0059	7.2
c1945	44.5	2430	48506.9	1020	4362.75	236896	1520	720	0.0063	7.6
c1951	49.5	3526	46793	1260	4093	211394	1260	1080	0.0073	8.9
c1955	54.5	2400	54298.9	1260	4799.03	230012	2040	720	0.0079	9.6
c1960	59.5	2880	51418	1260	5149	219278	1620	960	0.0083	10.1
c1963	64.5	3346	74917.4	1320	7081.51	188681	2100	720	0.0099	12.0
c1968	67.5	3136	68355.7	1260	6376.34	209544	1500	1020	0.0083	10.1
c1971	70.5	2160	48691.1	640	3369.71	237232	960	1020	0.0055	6.7
c1974	75.5	1800	28490.8	720	5028	249026	1560	840	0.0064	7.7
c1978	77.5	2220	36840	540	3615	255816	1080	640	0.0050	6.0
C20										
échantillon	profondeur (cm)	phyllo	quartz	feld-k	plagio	calcite	dolomite	ankérite	A+HA+D+Ce	%C allochthone
c201	0.5	1860	27349	840	2040	179344	1860	1380	0.0119	14.5
c2020	2.6	1620	28836	720	2333	209617	1620	960	0.0081	9.9
c2040	4.5	1440	28789	680	2223	185335	1560	1080	0.0094	11.4
c20401	6.7	1917	34125	680	2297	224993	1920	1440	0.0079	12.0
c20404	8.5	1680	28675	680	2601	229256	1260	1620	0.0080	9.7
c2012	11.5	2100	30407	720	3354	214833	1260	560	0.0065	10.3
c2016	13.5	1620	33306	720	2914	205984	1560	1200	0.0059	10.8
c2018	17.5	1740	35963	660	3201	201126	1560	920	0.0054	13.9
c2021	20.5	2100	36846	1200	3877	197094	1680	580	0.0066	13.0
c2025	24.5	2252	45631	900	6359	185251	2400	920	0.0153	18.7
c2030	29.5	2356	43946	1200	4629	186412	2280	620	0.0136	16.6
c2035	34.5	2300	35201	1260	2703	189519	2000	1500	0.0144	17.6
c2040	39.5	2362	47493	1200	4194	190467	2390	900	0.0113	13.8
c2043	44.5	3447	44136	1560	5625	179479	2280	1020	0.0123	14.8
c2050	49.5	3253	50670	1200	4887	160445	1980	980	0.0162	19.8
c2055	54.5	3440	48993	1800	4306	186554	1920	2640	0.0169	19.6
c2060	59.5	2665	42641	1200	7168	177803	2100	1440	0.0131	16.0
c2065	64.5	2364	52315	1800	5116	175151	2100	1500	0.0137	16.7
c2070	69.5	2501	41868	1140	4356	178029	1800	3180	0.0164	23.8

Annexe 5.9. Minéralogie des phyllosilicates des fractions <2µm et 2-16µm (CPS)

C19c

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Ik 2-16µm	TSP 2-16µm
c19c02	0,02		245	581	0	0	20	55	736	1763	354	104	0,0000
c19c03	20,1		357	898	0	0	45	67	1033	1660	371	89	0,0145
c19c04	30,4		419	998	0	0	41	55	1245	1686	370	117	0,0086
c19c05	40,5		316	751	0	25	45	55	947	1632	351	94	0,0140
c19c06	50,6		306	781	0	34	56	70	1035	2010	422	120	0,0177
c19c07	60,7		438	1454	0	55	96	95	1856	1520	476	119	0,0159
c19c08	70,8		594	1127	0	0	105	53	2385	2211	416	142	0,0000
c19c09	80,9	126	625	1115	0	0	110	55	1492	540	83	71	0,0000

C37

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Ik 2-16µm	TSP 2-16µm
c3702	0-2		854	903	0	29	114	74	1210	2419	557	166	0,0133
c3704	20,1		852	1594	0	56	151	83	1707	2554	659	198	0,0159
c3706	40,1		973	1631	0	79	174	114	1810	2724	690	212	0,0217
c3707	60,7		1140	1710	39	135	184	137	1783	2517	1024	319	0,0383
c3708	70,8		985	1254	35	151	237	168	1393	2353	688	284	0,0296
c3709	80,9		901	1363	54	180	231	168	1484	1814	562	187	0,0563
c3710	90,0		962	1533	40	209	217	191	1721	1820	556	179	0,0571
c3711	100,1		832	1586	39	232	214	199	1580	1934	592	158	0,0619
c3712	110,2		783	1176	46	209	226	191	1328	1640	546	94	0,0720
c3713	120,3		677	1053	32	273	236	220	1151	1599	357	109	0,1001
c3714	13-14		751	1125	60	262	231	181	1267	1903	463	136	0,0918
c3715	14-15		871	1073	52	187	174	108	1256	2099	466	157	0,0713
c3716	15-16		372	1751	59	177	145	130	1805	1560	497	152	0,0458
c3717	16-17		715	1351	43	130	138	165	1662	1975	560	171	0,0377
c3718	17-18		710	1620	26	124	109	82	1697	1839	492	162	0,0352
c3719	18-19		688	1471	34	88	97	101	1516	1746	542	162	0,0280
c3720	19-20		551	1806	0	78	117	139	1728	1951	940	262	0,0204
c3721	20-21		506	1801	0	41	105	100	1463	1676	712	216	0,0177
c3722	21-22		687	1646	0	47	125	156	1600	2107	779	246	0,0136
c3723	22-23		464	831	0	24	115	60	719	921	133	57	0,0167
c3724	23-24		631	1472	0	32	100	102	1445	2077	721	234	0,0105
c3725	24-25		145	1234	0	0	105	75	1064	1646	512	165	0,0000

C6

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Ik 2-16µm	TSP 2-16µm
c602	0,02		607	709	0	0	75	61	826	1746	641	171	0,0000
c606	30,6		602	1134	30	59	76	73	1259	1973	802	190	0,0234
c610	70,0		718	795	25	78	102	70	941	2285	985	224	0,0414
c612	100,2		725	956	40	85	99	93	1222	2362	840	295	0,0361
c614	120,4		550	681	25	86	97	99	914	2119	692	195	0,0483
c615	14-15		548	537	53	137	145	107	788	2164	517	147	0,0873
c616	15-16		571	1136	55	293	148	168	1364	2254	951	236	0,0990
c617	16-17		656	538	87	170	226	97	727	1609	216	60	0,1119
c618	17-18		477	879	80	313	214	201	1015	1669	500	154	0,1100
c619	18-19		510	713	99	483	317	301	1022	1892	558	195	0,1002
c620	19-20,5		491	626	100	320	249	191	835	1975	606	172	0,1015
c622	20,5-22		671	767	32	84	97	85	930	2219	823	160	0,0453
c623	22-23		540	645	0	61	90	80	842				0,0374
c624	23-24		625	733	0	34	102	95	1010				0,0234
c625	24-25		598	687	0	24	80	75	920				0,0041
c626	25-26		614	723	0	0	92	80	975				0,0000

C7

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Ik 2-16µm	TSP 2-16µm
c701	0,1	76	809	743	0	60	92	70	915	2319	641	203	0,0335
c703	2,5-2,5	129	907	760	34	210	265	129	1112	2594	710	217	0,0950
c706	50,6	114	911	1011	80	470	313	215	1128	2170	705	231	0,1691
c707	6,5-7,5	05	680	532	67	238	308	217	757	2235	459	139	0,1833
c709	8,5-9,5	102	604	940	60	434	273	260	1180	2047	628	181	0,1542
c711	10-11	77	863	1043	54	391	348	340	1165	1882	707	239	0,1881
c713	12,5-13,5	102	844	446	45	245	343	174	617	1859	395	124	0,1653
c716	15-16	113	828	1082	70	420	260	217	1170	1792	600	183	0,1546
c721	20-21	87	1081	1043	37	219	232	157	1169	2194	756	214	0,0846
c726	25-26		842	1068	25	105	118	94	1180	1866	811	239	0,0300
c731	30-31	78	717	1028	34	55	112	115	1170	1845	785	217	0,0238
c734	33-34	130	747	717	0	97	160	90	1002	2743	681	207	0,0349
c736	35-36	56	808	862	56	204	172	152	986	2111	759	251	0,0926
c738	37-38		816	572	59	289	394	200	758	1936	426	134	0,1589
c741	40-41	109	752	690	49	137	111	86	815	1833	649	162	0,0793
c746	45-46	171	1006	954	25	32	138	89	1139	2145	1032	297	0,0144
c751	50-51	234	1022	925	0	0	198	112	1141	2470	765	208	0,0000

C7b

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Ik 2-16µm	TSP 2-16µm
c7b02	0,02		604	757	0	25	110	40	813	1535	573	155	0,0153
c7b03	30,6		697	969	25	92	97	93	1135	2623	692	188	0,0402
c7b07	60,7		916	967	0	95	119	110	1218	2746	638	187	0,0397
c7b10	80,0		999	705	0	0	124	79	1034	2043	747	194	0,0000
c7b23	21-23,5		841	1114	0	0	120	95	1272	2501	622	170	0,0000
c7b26	24,5-26,5		999	1088	0	0	101	55	1359	2568	666	192	0,0800
c7b31	27-34		1134	1030	0	30	99	60	1340	2716	853	251	0,0122
c7b40	35-40		976	1514	0	45	105	96	1792	2639	805	230	0,0131
c7b42	41-42		789	697	0	111	189	131	990	2534	873	197	0,0575
c7b43	42-43		264	1256	0	70	125	138	1430	2412	807	219	0,0242
c7b45	43-45		701	1189	0	37	85	115	1439	2544	830	248	0,0133
c7b48	47-48		350	1224	0	0	95	120	1373				0,0000

C7c

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Ik 2-16µm	TSP 2-16µm
c7c02	0,02		510	906	0	0	61	71	999	1837	546	160	0,0001
c7c08	60,8		638	1009	0	78	80	143	1576	1934	770	226	0,0229
c7c11	100,1		736	1202	0	87	97	154	1725	2629	1051	260	0,0234
c7c13	11,5-13,5		679	1416	38	216	144	164	1437	2025	789	205	0,0663
c7c19	17-19		646	1100	0	151	155	124	1207	2172	651	177	0,0585
c7c25	23-25		816	1133	40	191	107	160	1243	2087	727	194	0,0701
c7c31	20-21		662	926	35	125	131	120	1072	2112	638	174	0,0557
c7c37	25-27		607	978	45	180	136	131	1088	2171	659	151	0,0757
c7c44	42-44		560	733	46	136	113	131	913	1853	480	137	0,0714
c7c46	45-46		512	941	0	63	77	25	1061	1942	617	172	0,0294
c7c48	47-48		488	893	59	226	160	168	1025	1559	533	131	0,0976
c7c50	49-50		610	1574	0	82	80	107	1517	1658	798	253	0,0250
c7c52	51-52		985	973	0	0	145	105	1284	2223	619	268	0,0000

Annexe 5.9. Minéralogie des phyllosilicates des fractions <2µm et 2-16µm (CPS)

C8

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Fk 2-16µm	Tp 2-16µm
C8_2.5	0-2.5	62	474	1047	21.874	0	54.036	75	1190	1890	930	255	0.0000
C8_3	2.5-5	62	538	821	31.742	32	58.104	75	1024	1890	466	127	0.0164
C8_4	4.5-5	92	676	773	22.984	38	87.88	75	1033	2166	464	122	0.0181
C8_8	7-8	75	600	564	0	23	76.3	75	956	3292	354	82	0.0152
C8_9.5	9-9.5	129	750	694	21.25	0	81.25	75	1066	2773	426	97	0.0000
C8_11	10-11	33	529	712	0	0	31.201	75	928	2088	366	93	0.0000
C8_11.6	11-11.6	50	613	869	0	25	71.308	75	1117	2111	368	114	0.0120
C8_12.1	11.6-12.1	51	315	883	0	32	59.85	316	1150	1949	388	121	0.0124
C8_13.1	12.1-13.1	20	408	859	0	42	66.015	309	1033	1671	469	140	0.0185
C8_13.8	13.1-13.8	42	396	1134	22.176	70	72.072	373	1176	1609	562	174	0.0154
C8_14.5	13.8-14.5	26	362	736	21.15	32	58.124	266	891	1589	541	142	0.0359
C8_15.2	14.5-15.2	56	513	1153	21.033	122	93.983	364	1224	1732	524	167	0.0419
C8_15.8	15.2-15.8	51	659	1215	44.133	131	119.928	403	1263	1463	475	133	0.0415
C8_16.3	15.8-16.3	112	490	691	31.35	147	111.23	243	823	1554	432	155	0.0752
C8_17	16-17	68	549	843	26.901	199	137.799	428	991	2659	849	282	0.0809
C8_17.7	17-17.7	89	572	965	46.904	185	157.872	394	1118	1764	463	144	0.0695
C8_18.4	17.7-18.4	74	354	1018	57.984	443	221.952	612	1151	1736	500	178	0.1174
C8_19	18-18.9	125	562	1079	83.176	677	324.836	755	1227	2025	490	157	0.1811
C8_19.5	19-19.5	136	591	857	131.202	937	308.850	875	1033	2069	456	112	0.2530
C8_20	19.5-20	222	515	748	135.143	1557	612.85	1137	1074	2350	588	183	0.3448
C8_20.5	20-20.5	235	457	888	133.901	1866	706.065	1446	1088				0.3329
C8_21.2	20.5-21.2	132	304	1072	40.128	885	127.072	918	1197	1737	581	196	0.2173
C8_23.5	23-23.5	143	553	1151	19.908	140	122.713	475	1320	2344	644	210	0.0454
C8_27	26-27	278	1103	851	0	0	102.3	228	1085	2261	920	213	0.0001
C8_36	35-36	164	1285	1154	0	0	95	75	1343	2780	670	203	0.0001
C8_45	44-45	209	1367	1144	0	0	105	75	1356	2590	686	214	0.0001
C8_55	54-55	149	1161	1296	0	0	100	75	1520	2436	740	228	0.0000
C8_68	67-68	355	1191	1520	0	0	105	75	847	1206	139	141	0.0000

C9

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Fk 2-16µm	Tp 2-16µm
C901	0-2	30	535	1105	29	118	110	120	1043	1073	529	154	0.0495
C905	4-5.66	87	836	1234	0	54	109	82	1318	1882	758	210	0.0201
C909	8-10	35	410	765	25	42	79	50	941	1574	691	183	0.0234
C912	11-12		718	754	29	308	181	144	952	5093	634	176	0.1012
C913	12-13		633	907	38	277	193	196	1150	1667	509	130	0.1095
C914	13-14	129	506	822	41	258	220	188	1050	1341	359	134	0.1128
C915	14-15		711	867	73	321	239	197	1057	1738	706	132	0.1314
C916	15-16	118	667	691	25	152	170	81	948	2182	461	127	0.0812
C917	16-17	166	737	1034	0	99	141	70	1146	1333	578	205	0.0421
C918	17-18	147	589	976	0	52	126	131	1012	1563	500	136	0.0240
C921	20-22	0	869	1265	0	40	87	85	1337	2141	857	238	0.0147
C926	25-26	93	1284	917	38	25	149	64	1106	2002	660	160	0.0118
C929	29-30.5	215	1292	1268	31	0	103	119	1455	2527	752	246	0.0000
C933	34-35	299	1481	1083	27	0	204	109	1279	2553	847	211	0.0000
C954	51-54	163	947	1046	0	0	130	50	1256	2353	786	237	0.0000
C973	73-74	106	935	1150	0	0	124	85	1316	1708	777	199	0.0000

C13

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Fk 2-16µm	Tp 2-16µm
C1301	0-2	106	649	767	0	0	118	11	902	2325	760	257	0.0000
C1305	4-5	0	831	701	0	66	106	90	791	1335	498	160	0.0300
C1309	9-10	171	648	937	0	61	128	91	957	1624	501	164	0.0305
C1314	13-14	77	671	923	0	43	119	109	1073	1721	574	177	0.0200
C1318	18-20	0	334	785	0	125	85	137	903	1457	520	167	0.0872
C1321	20-21	0	693	456	64	202	187	139	663	2696	435	165	0.1371
C1325	21-23	0	360	581	84	248	223	206	745	1864	356	126	0.1398
C1327	22-23	106	690	819	72	334	312	216	1001	2276	513	181	0.1409
C1324	23-24	08	766	781	56	300	306	193	1076	2533	499	202	0.1332
C1325	24-25	89	747	1085	53	304	218	158	1079	1763	510	174	0.1158
C1326	25-26	125	796	782	66	350	289	202	1079	2667	719	213	0.1081
C1327	26-27	89	856	891	0	150	247	167	1104	2800	659	179	0.0649
C1329	27-29		556	915	0	45	115	180	1083	2042	561	192	0.0213
C1330	29-31		404	1033	0	63	98	108	1045	1632	657	199	0.0280
C1333	31-33		534	1050	0	23	104	104	1104	1859	507	162	0.0110
C1336	35-36	178	988	1044	0	0	157	85	1113	2184	515	272	0.0000
C1341	40-41	162	1044	1235	0	0	143	86	1209	1999	512	206	0.0000
C1346	45-46	83	1044	837	0	0	123	75	951	2329	478	172	0.0000
C1352	56-58	0	904	1413	0	0	100	65	1555	2633	981	335	0.0000

C15

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Fk 2-16µm	Tp 2-16µm
C1501	0-1	33	616	1027	30	23	56	78	1100				0.0147
C1505	4-5	36	747	1031	37	69	88	112	1234				0.0283
C1506	5-6	50	493	742	21	45	66	77	976	1351	483	127	0.0245
C1507	6-7		427	682	34	89	82	107	901	1265	401	130	0.0500
C1508	7-8		468	627	29	109	110	126	912	1532	394	96	0.0614
C1509	8-9		496	962	38	148	129	144	1162	1630	728	212	0.0613
C1510	9-10	145	1232	1722	36	124	142	136	1201				0.0337
C1511	10-11	100	613	1273	25	85	76	110	1445	1440	543	176	0.0290
C1512	11-12	50	518	1329	26	90	98	75	1611	2195	663	157	0.0290
C1514	12-14	34	1151	1541	25	30	191	123	1408				0.0098
C1518	17-18	155	1074	1657	0	25	125	122	1541				0.0075
C1525	21-22	123	1201	1290	0	0	134	90	1432				0.0000
C1526	25-26	181	1373	1457	0	0	50	50	1700				0.0000
C1530	29-30	240	1640	961	0	0	50	50	963				0.0000
C1534	33-34	0	718	2075	0	0	65	65	2025				0.0000
C1539	38-39	123	760	1911	0	0	60	60	1911				0.0000
C1542	41-42	37	774	1612	0	0	60	60	1642				0.0000
C1544	45-46	49	858	1651	0	0	60	60	1651				0.0000
C1548	49-50	88	712	2011	0	0	60	60	2011				0.0000
C1554	53-54	0	742	1711	0	0	50	50	1711				0.0000
C1558	57-58	122	765	1973	0	0	50	50	1971				0.0001
C1565	64-65	0	793	2025	0	0	65	65	2025				0.0000

Annexe 5.9. Minéralogie des phyllosilicates des fractions <2µm et 2-16µm (CPS)

C19

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Fk 2-16µm	T/P 2-16µm
c19 1cm	031	39	414	607	0	0	55	74	750	1672	434	141	0.0090
c19 2cm	133	0	839	1235	0	32	74	86	1503	1816	573	171	0.0112
c19 4cm	335		604	1573	0	28	80	92	1781	1756	733	209	0.0081
c19 5cm	535,5	49	524	244	0	25	60	61	921	2097	722	217	0.0140
c19 6cm	5,536,5	0	782	1364	24	56	89	102	1549	1910	643	185	0.0184
c19 7cm	6,537,5	78	725	1213	25	66	120	123	1536	1744	632	180	0.0217
c19 8cm	7,538,5	80	863	1239	49	102	147	134	1540	1857	609	157	0.0338
c19 9cm	8,539,5	109	864	916	25	92	178	160	1191	1991	667	181	0.0393
c19 10cm	9,540,5	78	644	681	47	92	119	119	856	1996	684	209	0.0532
c19 11cm	10,541,5	83	902	1035	34	72	129	94	1353	1938	468	167	0.0286
c19 12cm	11,542,5	0	744	1036	38	57	110	96	1299	1938	429	116	0.0238
c19 13cm	12,543,5	33	862	1153	0	39	101	73	1380	1694	448	142	0.0145
c19 14cm	13,544,5	151	892	1184	0	29	144	112	1423	1984	780	213	0.0106
c19 15cm	14,545,5	0	1060	1109	0	0	135	108	1451	1992	590	166	0.0090
c19 17cm	15,547,5	138	944	1009	0	0	102	90	1237	1965	452	138	0.0090
c19 19cm	17,5519,6	0	1008	1400	0	0	123	110	1658	2052	611	168	0.0090
c19 20cm	19,5520,5	210	915	835	0	0	109	105	1057	2489	802	223	0.0090
c19 30cm	29,30	564	1546	1081	0	0	181	153	1345	2882	1067	317	0.0090
c19 40cm	39,40	250	1129	1015	0	0	96	75	1190	2055	779	207	0.0090
c19 52cm	51,52	177	1153	820	0	0	91	72	1037	2199	691	203	0.0090

C20b

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Fk 2-16µm	T/P 2-16µm
c20b03	033		579	730	0	40	87	74	791	1556	608	166	0.0244
c20b06	336		690	916	0	55	91	70	954	1668	641	138	0.0236
c20b08	638		730	813	0	74	135	68	1050	2151	554	177	0.0369
c20b09	839,5		211	1038	0	86	127	75	1281	2311	569	144	0.0347
c20b11	9,5411		702	1093	0	98	112	114	1312	2179	561	160	0.0374
c20b12	11,5412		821	854	0	107	171	106	1169	2418	505	144	0.0472
c20b13	12,5413		766	1135	43	184	165	121	1369	2508	637	154	0.0655
c20b14	13,14		225	1309	50	215	194	143	1440	2109	721	206	0.0692
c20b15	14,18,5		757	1173	52	246	187	145	1387	2293	868	207	0.0834
c20b17	15,5417		733	877	65	166	176	95	1035	1886	748	218	0.0786
c20b18	17,18,5		699	912	46	127	146	102	1117	2003	486	163	0.0562
c20b20	18,5820		788	1028	55	116	136	106	1185	2024	931	245	0.0476
c20b21	20,21		722	1054	32	80	120	101	1302				0.0328
c20b22	21,22		688	966	0	54	110	95	1012				0.0254
c20b23	22,23		754	1065	0	35	98	90	1143				0.0150
c20b24	23,24		766	1109	0	25	102	96	1240				0.0102
c20b25	24,25		693	1062	0	0	127	83	1156				0.0090

C23

échantillon	prof (cm)	Smec <2µm	M<2µm	M2-16µm	Tc<2µm	Tc2-16µm	Kaol <2µm	Kaol 2-16µm	Chl 2-16µm	Qz 2-16µm	Plag 2-16µm	Fk 2-16µm	T/P 2-16µm
c2302	032		621	1248	0	35	101	80	1443	2052	792	226	0.0120
c2304	261		717	1210	0	40	116	102	1379	2104	620	189	0.0146
c2306	436		716	1368	0	52	100	113	1459	1929	680	224	0.0173
c2307	637		727	1096	0	63	99	87	1150	1822	668	143	0.0163
c2308	708		608	1593	0	72	94	103	1482	1588	579	154	0.0222
c2309	809		716	1797	0	115	105	94	1708	1818	772	235	0.0310
c2310	8319		696	1492	0	104	141	99	1448	1775	655	170	0.0330
c2311	10311		697	1232	33	119	131	92	1305	1993	765	209	0.0423
c2312	11812		677	1412	40	123	122	128	1371	1668	627	153	0.0405
c2313	12813		702	1660	32	130	124	118	1565	1706	699	181	0.0374
c2314	13914		553	838	0	41	129	70	1007	1843	205	87	0.0218
c2315	14315		687	1843	0	110	124	126	1720	1927	789	216	0.0286
c2316	15916		878	868	0	28	95	68	1116	2395	528	156	0.0135
c2317	16917		749	1493	0	28	86	66	1544	2233	880	267	0.0089
c2318	17918		762	2047	0	33	83	97	1757	1957	963	274	0.0084
c2319	18919		848	1409	0	24	103	80	1578	2352	1025	265	0.0078
c2320	19920		798	1536	0	0	105	81	1732	2562	877	254	0.0090

Annexe 5.10. A/Tale, C/tale et [T/P]max

	prof (m)	A/Tale (mg/cm2)	C/tale (%)	T/P max
C6	40	12,56	0,84	0,353
C7	107	31,49	0,85	0,188
C9	110	6,21	0,45	0,131
C13	136	13,56	0,61	0,141
C15	73	3,24	0,39	0,061
C37	145	6,42	0,59	0,103
C19	55	1,73	0,19	0,053
C19c	55	0,44	0,08	0,018
c7b	110	3,74	0,09	0,058
c7c	110	18,87	0,40	0,098
c6c	128	10,64	0,57	0,190
c20b	131	6,71	0,44	0,083
c23	133	2,88	0,26	0,043

Annexe 5.11. Composition des micas et des chlorites; LS

C15

Echantillon	Prof (cm)	Fraction	Ill 001	Ill 002	Ill 005	Chl 001	Chl 002	Chl 003	Smec	LS (2N)	LS (2G)
C15001	1	< 2µm	570	220	114	186	458	137	33	0.185	0.162
C15005	5	< 2µm	674	258	22	226	558	158	38	0.192	0.177
C15010	10	< 2µm	1128	407	187	296	817	237	145	0.222	0.214
C15014	14	< 2µm	1086	436	233	309	797	244	34	0.236	0.222
C15018	18	< 2µm	1002	345	164	256	687	186	155	0.257	0.236
C15022	22	< 2µm	1129	503	249	227	884	269	122	0.244	0.214
C15026	26	< 2µm	1305	477	229	292	889	258	181	0.272	0.236
C15030	30	< 2µm	1640	784	462	407	1187	412	240	0.287	0.251
C15034	34	< 2µm	718	270	136	223	560	148	0	0.192	0
C15039	39	< 2µm	760	266	145	228	540	149	121	0.221	0.206
C15042	42	< 2µm	774	283	126	228	576	165	27	0.214	0.214
C15046	46	< 2µm	858	303	139	248	609	161	40	0.251	0.216
C15050	50	< 2µm	712	244	127	211	524	158	88	0.228	0.214
C15054	54	< 2µm	742	263	118	229	567	161	0	0.229	0.207
C15058	58	< 2µm	765	305	149	251	630	164	122	0.199	0.192
C15065	65	< 2µm	793	307	145	228	597	185	0	0.19	0.19

C15

Echantillon	Prof (cm)	Fraction	Ill 001	Ill 002	Ill 005	Chl 001	Chl 002	Chl 003	LS
C15001	1	2-16 µm	908	449	277	47	1026	328	0.147
C15005	5	2-16 µm	946	480	317	282	1209	358	0.162
C15010	10	2-16 µm	1560	675	414	449	1647	521	0.148
C15014	14	2-16 µm	1363	572	332	392	1406	427	0.147
C15018	18	2-16 µm	1506	687	437	394	1541	474	0.147
C15022	22	2-16 µm	1168	622	407	319	1432	491	0.154
C15026	26	2-16 µm	1318	654	442	343	1539	500	0.162
C15030	30	2-16 µm	1023	354	155	297	961	286	0.184
C15034	34	2-16 µm	2246	860	404	657	2075	576	0.125
C15039	39	2-16 µm	1961	753	386	549	1911	536	0.125
C15042	42	2-16 µm	1604	690	335	420	1642	519	0.125
C15046	46	2-16 µm	1687	679	353	505	1659	511	0.147
C15050	50	2-16 µm	1982	758	370	610	2011	599	0.132
C15054	54	2-16 µm	1661	517	333	472	1711	517	0.14
C15058	58	2-16 µm	2025	758	348	634	1971	557	0.125
C15065	65	2-16 µm	2026	837	1537	605	2025	617	0.125

C19

Echantillon	Prof (cm)	Fraction	Ill 001	Ill 002	Ill 005	Chl 001	Chl 002	Chl 003	Smec	LS (2N)	LS (2G)
c19 1cm	1	< 2µm	414	165	86	136	312	90	39	0.188	0.169
c19 2cm	2	< 2µm	839	320	154	272	715	212	0	0.22	0.192
c19 4cm	4	< 2µm	604	258	130	202	561	310	0	0.214	
c19 5cm	5	< 2µm	534	192	94	184	396	115	49	0.205	0.185
c19 6cm	6	< 2µm	782	306	146	288	731	377	0	0.228	0.183
c19 7cm	7	< 2µm	728	267	132	267	638	352	78	0.227	0.184
c19 8cm	8	< 2µm	863	307	154	291	768	408	80	0.199	0.185
c19 9cm	9	< 2µm	864	321	169	278	730	391	109	0.228	0.184
c19 10cm	10	< 2µm	644	237	124	219	524	155	78	0.214	0.19
c19 11cm	11	< 2µm	902	328	178	289	785	410	102	0.221	0.177
c19 12cm	12	< 2µm	744	293	160	208	629	336	0	0.221	0.2
c19 13cm	13	< 2µm	862	291	158	272	679	211	50	0.206	0.221
c19 14cm	14	< 2µm	892	336	178	291	741	362	151		
c19 15cm	15	< 2µm	1060	388	198	309	880	444	0	0.123	0.2
c19 17cm	16.5	< 2µm	944	354	185	287	761	435	138		
c19 19cm	18.5	< 2µm	1008	383	202	276	801	433	0		
c19 20cm	20	< 2µm	915	335	176	264	653	178	210	0.229	0.192
c19 30cm	30	< 2µm	1546	695	397	432	1081	365	564	0.28	0.257
c19 40cm	40	< 2µm	1129	460	228	316	781	246	350	0.243	0.235
c19 51.5cm	52	< 2µm	1153	439	208	295	749	214	177	0.252	0.235

C19

Echantillon	Prof (cm)	Fraction	Ill 001	Ill 002	Ill 005	Chl 001	Chl 002	Chl 003	LS
c19 1cm	1	2-16 µm	607	301	191	212	750	247	0.206
c19 2cm	2	2-16 µm	1235	582	319	364	1503	969	0.155
c19 4cm	4	2-16 µm	1573	664	374	491	1781	1067	0.147
c19 5cm	5	2-16 µm	744	389	272	255	921	311	0.191
c19 6cm	6	2-16 µm	1364	615	336	407	1549	971	0.147
c19 7cm	7	2-16 µm	1313	563	322	410	1536	840	0.139
c19 8cm	8	2-16 µm	1239	569	337	404	1540	908	0.14
c19 9cm	9	2-16 µm	916	442	272	308	1191	745	0.152
c19 10cm	10	2-16 µm	681	361	260	249	856	290	
c19 11cm	11	2-16 µm	1025	504	280	336	1353	833	0.162
c19 12cm	12	2-16 µm	1046	458	254	359	1299	777	0.162
c19 13cm	13	2-16 µm	1158	487	278	384	1389	806	0.147
c19 14cm	14	2-16 µm	1184	568	331	354	1423	914	
c19 15cm	15	2-16 µm	1100	579	303	305	1451	933	0.154
c19 17cm	16.5	2-16 µm	1000	486	275	323	1237	767	
c19 19cm	18.5	2-16 µm	1400	597	326	436	1658	1030	
c19 20cm	20	2-16 µm	845	433	294	266	1057	345	0.192
c19 30cm	30	2-16 µm	1081	513	404	335	1343	476	0.165
c19 40cm	40	2-16 µm	1015	510	312	332	1190	410	0.192
c19 51.5cm	52	2-16 µm	820	434	279	215	1037	377	0.171

Annexe 5.12.A Datation de la carotte C37 à l'aide du modèle CR:CS (210Pb et 137Cs)

Echantillon	Teneur en eau	Porosité	Poids mesuré [g/cm2]	Poids cumulé base [g/cm2]	Poids cumulé milieu [g/cm2]	Ra-226 [dpm/g]	Erreur 1 sigma	Pb-210 en excès [dpm/g]	Erreur 1 sigma	Datation (années AD)	basée sur taux de sédimentation	Cs-137 [pCi/g]	Erreur [pCi/g]
1	0.718	0.869	0.34	0.34	0.17	2.87	0.17	7.58	0.30	1992.9	TS 1	1.90	0.08
2	0.716	0.868	0.34	0.68	0.51	3.43	0.20	6.28	0.33	1991.2	TS 1	2.15	0.06
3	0.699	0.858	0.37	1.05	0.87	1.55	0.15	9.13	0.30	1989.4	TS 1	2.55	0.09
4	0.693	0.855	0.38	1.43	1.24	2.03	0.23	8.99	0.39	1987.5	TS 1	3.19	0.10
5	0.676	0.844	0.40	1.84	1.63	2.51	0.17	7.61	0.33	1985.5	TS 1	3.16	0.08
6	0.672	0.842	0.41	2.25	2.04	2.60	0.23	5.82	0.32	1977.5	TS 2	2.65	0.08
7	0.678	0.845	0.40	2.65	2.45	2.69	0.15	3.64	0.23	1974.2	TS 2	2.08	0.05
8	0.668	0.839	0.42	3.07	2.86	1.44	0.13	5.15	0.20	1970.8	TS 2	2.52	0.08
9	0.686	0.850	0.39	3.46	3.26	2.19	0.23	4.55	0.28	1967.4	TS 2	3.51	0.11
10	0.656	0.832	0.44	3.89	3.68	2.94	0.19	3.62	0.26	1964.0	TS 2	4.47	0.10
11	0.666	0.838	0.42	4.32	4.10	2.27	0.15	3.34	0.23	1960.4	TS 2	3.51	0.10
12	0.663	0.836	0.43	4.74	4.53	2.48	0.14	2.02	0.20	1956.9	TS 2	2.41	0.06
13	0.646	0.826	0.45	5.19	4.97	2.20	0.18	3.01	0.23	1953.3	TS 2	1.78	0.06
14	0.650	0.828	0.45	5.64	5.42	1.78	0.17	2.46	0.22	1949.6	TS 2	0.93	0.04
15	0.639	0.822	0.46	6.10	5.87	1.75	0.15	2.86	0.21	1945.8	TS 2	0.37	0.02
16	0.630	0.816	0.48	6.58	6.34	1.74	0.26	2.65	0.29	1939.1	TS 3	0.20	0.02
17	0.624	0.812	0.49	7.07	6.83	1.95	0.17	2.86	0.22	1932.2	TS 3	0.06	0.02
18	0.617	0.807	0.50	7.58	7.32	1.73	0.21	2.40	0.24	1925.1	TS 3		
19	0.597	0.794	0.54	8.11	7.84	1.89	0.25	1.82	0.27	1917.7	TS 3		
20	0.598	0.795	0.53	8.64	8.38	2.04	0.14	1.73	0.17	1905.9	TS 4	0.04	0.02
21	0.575	0.779	0.57	9.22	8.93	2.12	0.23	1.77	0.26	1893.7	TS 4		
22	0.580	0.782	0.57	9.78	9.50	2.20	0.23	1.31	0.26	1881.1	TS 4		
23	0.567	0.773	0.59	10.37	10.08	2.49	0.17	1.08	0.21	1868.3	TS 4		
24	0.564	0.771	0.60	10.97	10.67	2.49	0.23	0.50	0.24	1855.2	TS 4		
25	0.548	0.759	0.63	11.60	11.28	2.70	0.15	-0.74	0.17				
26	0.547	0.758	0.63	12.23	11.91	1.51	0.15	0.34	0.18				
27	0.529	0.745	0.66	12.89	12.56	1.62	0.15	0.03	0.18				
28	0.515	0.734	0.69	13.58	13.24	1.87	0.22	-0.06	0.24				
29	0.517	0.736	0.69	14.27	13.93	2.13	0.16	-0.60	0.18				
30	0.519	0.737	0.68	14.95	14.61	1.56	0.17	0.01	0.19				
31	0.520	0.738	0.68	15.63	15.29								
32	0.515	0.734	0.69	16.33	15.98								

Taux de sédiment.	TS	Erreur	TS
TS 1	0.196	0.05	basé sur: TS 1
TS 2	0.121	0.016	Pb-210
TS 3	0.070	0.008	Pb-210
TS 4	0.045	0.01	Pb-210

Evénement	Date	Prot.	TS
Tchernobyl	1.mai.86	1.473	0.196
Bomb tests	1.juin.64	3.676	0.099

Annexe 5.12.B Datation de la carotte C37 à l'aide du modèle CRS (210Pb et 137Cs)

Echantillon	Teneur en eau	Porosité	Poids mesuré [g/cm2]	Poids cumulé base [g/cm2]	Poids cumulé milieu [g/cm2]	Pb-210 en excès [dpm/g]	Erreur 1 sigma	A cumulés milieu (pds * 210Pbex)	taux accumulé [g/cm2*an]	Datation (années AD)	datacion compa avec modèle CR.CS	Cs-137 [pCi/g]	Erreur [pCi/g]
1	0.718	0.869	0.34	0.34	0.17	7.58	0.30	37.43	0.154	1992.7	1992.9	1.90	0.08
2	0.716	0.868	0.34	0.68	0.51	6.28	0.33	35.05	0.174	1990.6	1991.2	2.15	0.06
3	0.699	0.858	0.37	1.05	0.87	9.13	0.30	32.29	0.110	1988.0	1989.4	2.55	0.09
4	0.693	0.855	0.38	1.43	1.24	8.99	0.39	28.90	0.100	1984.4	1987.5	3.19	0.10
5	0.676	0.844	0.40	1.84	1.63	7.61	0.33	25.66	0.105	1980.6	1985.5	3.16	0.08
6	0.672	0.842	0.41	2.25	2.04	5.82	0.32	22.92	0.123	1977.0	1977.5	2.65	0.08
7	0.678	0.845	0.40	2.65	2.45	3.64	0.23	21.00	0.180	1974.2	1974.2	2.08	0.05
8	0.668	0.839	0.42	3.07	2.86	5.15	0.20	19.19	0.116	1971.3	1970.8	2.52	0.08
9	0.686	0.850	0.39	3.46	3.26	4.55	0.28	17.23	0.118	1967.8	1967.4	3.51	0.11
10	0.656	0.832	0.44	3.89	3.68	3.62	0.26	15.55	0.134	1964.5	1964.0	4.47	0.10
11	0.666	0.838	0.42	4.32	4.10	3.34	0.23	14.06	0.131	1961.3	1960.4	3.51	0.10
12	0.663	0.836	0.43	4.74	4.53	2.02	0.20	12.92	0.199	1958.6	1956.9	2.41	0.06
13	0.646	0.826	0.45	5.19	4.97	3.01	0.23	11.81	0.122	1955.7	1953.3	1.78	0.06
14	0.650	0.828	0.45	5.64	5.42	2.46	0.22	10.58	0.134	1952.2	1949.6	0.93	0.04
15	0.639	0.822	0.46	6.10	5.87	2.86	0.21	9.37	0.102	1948.3	1945.8	0.37	0.02
16	0.630	0.816	0.48	6.58	6.34	2.65	0.29	8.07	0.095	1943.5	1939.1	0.20	0.02
17	0.624	0.812	0.49	7.07	6.83	2.86	0.22	6.73	0.073	1937.7	1932.2	0.06	0.02
18	0.617	0.807	0.50	7.58	7.32	2.40	0.24	5.43	0.071	1930.8	1925.1		
19	0.597	0.794	0.54	8.11	7.84	1.82	0.27	4.35	0.074	1923.6	1917.7		
20	0.598	0.795	0.53	8.64	8.38	1.73	0.17	3.40	0.061	1915.7	1905.9	0.04	0.02
21	0.575	0.779	0.57	9.22	8.93	1.77	0.26	2.43	0.043	1904.9	1893.7		
22	0.580	0.782	0.57	9.78	9.50	1.31	0.26	1.55	0.037	1890.4	1881.1		
23	0.567	0.773	0.59	10.37	10.08	1.08	0.21	0.86	0.025	1871.6	1868.3		
24	0.564	0.771	0.60	10.97	10.67	0.50	0.24	0.39	0.024	1846.4	1855.2		
25	0.548	0.759	0.63	11.60	11.28	-0.74	0.17					0.03	0.02
26	0.547	0.758	0.63	12.23	11.91	0.34	0.18						
27	0.529	0.745	0.66	12.89	12.56	0.03	0.18						
28	0.515	0.734	0.69	13.58	13.24	-0.06	0.24						
29	0.517	0.736	0.69	14.27	13.93	-0.60	0.18						
30	0.519	0.737	0.68	14.95	14.61	0.01	0.19						
31	0.520	0.738	0.68	15.63	15.29								
32	0.515	0.734	0.69	16.33	15.98								

Taux de sédiment.	TS [g/cm2an]	Erreur [g/cm2an]	TS basé sur:
Cs137	0.196	0.05	Cs137 Tcher.
0-15cm	0.133	0.037	Pb-210
16-19cm	0.075	0.045	Pb-210
20-24cm	0.032	0.066	Pb-210

Evénement	Date	Prot. g/cm2	TS
Tchernobyl	1.mai.86	1.473	0.196
Bomb test	1.jan.64	3.676	0.099

Annexe 5.13. Géochimie des carottes C19c et C18

C19c

échantillon	Prof (cm)	RI (%)	Htot (%)	Ntot (%)	Clot (%)	Cmin (%)	Corg (%)	Ca (%)	Mg (%)	Sr (%)	SiO2 (%)	Al (%)	Na (%)	K (%)	Fe (%)	Mn (%)	PO4 (%)	Balance
C19c01	0.5	26.72	0.58	0.25	10.47	7.89	2.57	26.34	0.35	0.0231	1.418	0.11	0.01	0.029	0.74	0.061	0.315	97.71
C19c03	2.5	24.91	0.5	0.2	10.63	8.22	2.41	28.22	0.34	0.0237	1.017	0.123	0.01	0.026	0.644	0.04	0.252	98.94
C19c05	4.5	24.65	0.51	0.23	10.6	8.28	2.32	28.76	0.303	0.0246	0.773	0.115	0.008	0.021	0.546	0.035	0.197	98.94
C19c07	6.5	22.05	0.33	0.12	10.24	8.86	1.38	30.04	0.313	0.0208	0.673	0.143	0.008	0.022	0.466	0.041	0.13	99.93
C19c09	8.5	20.86	0.28	0.09	10.08	8.91	1.17	31.3	0.345	0.0197	1.077	0.171	0.01	0.038	0.544	0.045	0.114	101.48
C19c11	10.5	26.44	0.28	0.06	9.26	8.23	1.08	28.78	0.345	0.0183	0.746	0.16	0.008	0.027	0.506	0.047	0.099	100.54
C19c13	12.5	26.94	0.32	0.06	9.09	8.18	0.91	27.46	0.379	0.0172	0.715	0.168	0.009	0.032	0.578	0.05	0.088	99.3
C19c15	14.5	28.69	0.3	0.06	8.81	7.88	0.93	27.35	0.365	0.0164	0.906	0.166	0.01	0.034	0.648	0.055	0.088	100.14
C19c17	16.5	33.46	0.33	0.06	8.19	7.35	0.84	26.02	0.381	0.0156	0.795	0.165	0.008	0.035	0.629	0.052	0.086	100.95
C19c19	18.5	34.87	0.34	0.07	7.96	7.15	0.82	24.73	0.456	0.0151	1.048	0.174	0.01	0.047	0.821	0.056	0.09	100.82
C19c21	20.5	33.73	0.34	0.06	8.23	7.4	0.82	25.28	0.402	0.0149	0.842	0.164	0.008	0.039	0.773	0.056	0.091	100.89
C19c23	22.5	35.52	0.35	0.07	8.08	7.09	0.98	24.61	0.379	0.0151	0.844	0.179	0.008	0.037	0.695	0.059	0.093	100.43
C19c25	24.5	34.01	0.36	0.08	8.15	7.12	1.03	25.11	0.477	0.0146	1.263	0.202	0.009	0.046	0.916	0.059	0.095	101.02
C19c27	26.5	36.34	0.35	0.08	8.03	6.98	1.05	24.5	0.385	0.0144	1.202	0.205	0.009	0.044	0.812	0.058	0.099	101.5
C19c29	28.5	35.62	0.38	0.07	7.92	6.96	0.96	24.3	0.408	0.0145	1.254	0.189	0.008	0.044	0.87	0.059	0.098	100.62
C19c31	30.5	39.55	0.42	0.09	7.56	6.39	1.17	22.51	0.431	0.0137	1.303	0.174	0.008	0.05	0.962	0.06	0.103	100.28
C19c33	32.5	34.26	0.38	0.09	8.21	7	1.22	24.89	0.426	0.0143	1.281	0.158	0.009	0.047	0.994	0.068	0.104	100.53
C19c35	34.5	36.78	0.36	0.09	7.96	6.85	1.11	23.67	0.403	0.0149	0.874	0.152	0.007	0.038	0.863	0.065	0.105	99.96
C19c37	36.5	38.22	0.43	0.09	7.69	6.54	1.15	22.78	0.455	0.014	1.333	0.157	0.008	0.05	1.074	0.072	0.107	100.23
C19c39	38.5	38.49	0.39	0.09	7.87	6.74	1.13	23.36	0.302	0.0152	1.039	0.158	0.007	0.04	0.665	0.066	0.104	100.23
C19c41	40.5	45.29	0.5	0.08	6.91	5.91	1	20.41	0.45	0.0138	0.871	0.159	0.008	0.047	1.025	0.063	0.108	101.05
C19c43	42.5	46.03	0.49	0.1	6.76	5.66	1.1	19.34	0.475	0.0125	1.507	0.188	0.01	0.059	1.19	0.059	0.11	100.63
C19c45	44.5	38.17	0.43	0.09	7.95	6.84	1.11	22.86	0.323	0.0144	1.033	0.173	0.008	0.036	0.806	0.06	0.11	100.1
C19c47	46.5	29.5	0.36	0.08	9.1	7.93	1.16	26.95	0.378	0.0166	1.008	0.151	0.008	0.03	0.72	0.062	0.108	100.81
C19c49	48.5	29.7	0.34	0.08	8.88	7.8	1.09	27.23	0.333	0.0159	1.317	0.144	0.008	0.034	0.77	0.059	0.107	101.32
C19c51	50.5	31.95	0.33	0.1	8.76	7.59	1.17	26.2	0.333	0.0161	0.904	0.137	0.008	0.032	0.721	0.056	0.108	100.8
C19c53	52.5	28.97	0.37	0.08	9.02	7.88	1.14	26.49	0.388	0.016	1.097	0.14	0.009	0.034	0.737	0.055	0.101	99.62
C19c55	54.5	29.35	0.35	0.07	8.85	7.82	1.03	27.16	0.341	0.0162	0.971	0.139	0.009	0.031	0.689	0.057	0.101	100.38
C19c57	56.5	33.82	0.35	0.07	8.21	7.11	1.1	25.71	0.356	0.0157	1.128	0.142	0.01	0.036	0.768	0.056	0.104	100.65
C19c59	58.5	28.11	0.35	0.08	8.92	7.68	1.24	27.87	0.424	0.0163	1.196	0.139	0.01	0.046	0.938	0.058	0.101	100.74
C19c61	60.5	28.01	0.36	0.09	9.12	7.89	1.24	26.11	0.308	0.0157	1.196	0.14	0.01	0.031	0.741	0.06	0.102	98.13
C19c63	62.5	31.52	0.38	0.07	8.6	7.5	1.1	26.56	0.34	0.0151	0.856	0.139	0.009	0.037	0.808	0.061	0.099	100.78
C19c65	64.5	32.11	0.36	0.08	8.61	7.49	1.12	26.68	0.302	0.0158	1.008	0.125	0.007	0.029	0.693	0.054	0.097	101.16
C19c67	66.5	29.83	0.34	0.06	8.82	7.79	1.03	26.61	0.324	0.0157	1.006	0.144	0.009	0.032	0.693	0.051	0.093	100.01
C19c69	68.5	36.5	0.41	0.08	8.06	6.8	1.26	23.7	0.381	0.0143	1.283	0.14	0.008	0.04	0.853	0.047	0.093	99.81
C19c71	70.5	36.29	0.42	0.08	8.06	6.95	1.11	24.5	0.397	0.0151	1.338	0.137	0.013	0.042	0.909	0.05	0.101	101.52
C19c73	72.5	28.02	0.33	0.08	9.18	8.07	1.11	27.39	0.393	0.0164	0.957	0.135	0.008	0.027	0.628	0.049	0.091	99.97
C19c75	74.5	24.85	0.32	0.07	9.54	8.43	1.11	28.62	0.288	0.0164	0.877	0.138	0.007	0.025	0.655	0.047	0.088	99.82
C19c77	76.5	20.82	0.29	0.07	10.05	8.95	1.1	30.82	0.268	0.017	0.735	0.127	0.008	0.022	0.544	0.048	0.084	100.24
C19c79	78.5	14.47	0.24	0.07	10.97	9.85	1.12	33.46	0.218	0.0181	0.401	0.091	0.007	0.012	0.41	0.045	0.073	99.87
C19c81	80.5	15.53	0.27	0.06	10.74	9.73	1	32.73	0.262	0.0174	0.434	0.09	0.007	0.012	0.424	0.045	0.074	99.65

C18

Echantillon	Prof (cm)	RI (%)	Htot (%)	Ntot (%)	Clot (%)	Cmin (%)	Corg (%)	Ca (%)	Mg (%)	Sr (%)	SiO2 (%)	Al (%)	Na (%)	K (%)	Fe (%)	Mn (%)	PO4 (%)	Balance
c18-1	1	27.49	0.35	0.22	10.4	8.78	1.62	28.96	0.324	0.0257	1.678	0.127		0.02	0.282		0.162	101.15
c18-2	2.5	23.38	0.31	0.16	10.5	9.2	1.3	31.01	0.377	0.0263	1.364	0.169		0.022	0.368		0.129	101.48
c18-3	4	20.79	0.23	0.09	10.4	9.6	0.8	31.6	0.384	0.0218	0.932	0.144		0.014	0.247		0.104	99.81
c18-4	5.5	21.26	0.26	0.07	9.89	9.28	0.61	30.72	0.285	0.0203	0.878	0.122		0.017	0.244		0.096	99.96
c18-7	6.8	27.67	0.38	0.07	9.35	8.73	0.62	27.97	0.273	0.0188	0.865	0.138		0.016	0.315		0.095	98.9
c18-9	8	27.7	0.29	0.06	9.21	8.69	0.52	28.02	0.298	0.0174	0.995	0.176		0.03	0.367		0.085	99.37
c18-5	9	28.26	0.27	0.06	9.12	8.62	0.5	26.18	0.279	0.017	0.943	0.184		0.033	0.366		0.083	97.06
c18-10	11	35.4	0.36	0.06	8.14	7.63	0.51	28.7	0.246	0.0156	1.265	0.275		0.047	0.703		0.084	100.02
c18-11	11.7	34.45	0.33	0.06	8.27	7.78	0.49	25.91	0.277	0.0158	1.189	0.259		0.031	0.489		0.078	100.94
c18-14	14	35.56	0.38	0.07	8.16	7.59	0.57	25.36	0.363	0.0153	1.167	0.381		0.04	1.076		0.075	102.92
c18-15	15	34.68	0.38	0.06	7	6.44	0.56	26.13	0.319	0.0151	1.276	0.334		0.054	0.633		0.071	97.91
c18-17	17.3	31.75	0.26	0.06	8.31	7.75	0.56	26.33	0.232	0.0159	1.069	0.247		0.042	0.458		0.069	101.43
c18-18	17.8	19.86	0.21	0.04	10.2	9.75	0.45	31.13	0.18	0.0182	0.531	0.068		0.022	0.276		0.051	98.02
c18-20	20	18.64	0.23	0.04	10.3	9.84	0.46	32.1	0.182	0.0183	0.318	0.06		0.012	0.201		0.039	97.96
c18-21	21.5	19.17	0.24	0.04	10.2	9.74	0.46	33.1	0.193	0.0185	0.427	0.05		0.013	0.201		0.05	99.67
c18-22	23	24.94	0.28	0.05	9.88	9.33	0.55	30.98	0.27	0.0185	0.682	0.13		0.024	0.399		0.056	102.31
c18-24	26	29.73	0.34	0.06	8.88	8.34	0.54	29.34	0.25	0.0169	0.841	0.169		0.03	0.523		0.04	102.2
c18-25	23.5	23.67	0.29	0.05	9.61	9.08	0.53	30.84	0.237	0.0176	0.789	0.165		0.023	0.343		0.05	100.11
c18-26	28.3	22.15	0.28	0.05	9.98	9.44	0.54	32.17	0.227	0.0179	0.605	0.103		0.018	0.234		0.057	100.89
c18-28	31.5	18.86	0.25	0.05	10.4	9.88	0.52	31.85	0.221	0.0189	0.446	0.079		0.012	0.215		0.063	98.29
c18-30	33.9	20.63	0.1	0.06	10.3	9.68	0.62	30.84	0.239	0.0183	0.613	0.131		0.015	0.284		0.055	98.57
c18-32	37	20.22	0.27	0.05	10.3	9.8	0.5	30.87	0.194	0.0187	0.478	0.106		0.012	0.263		0.054	98.24
c18-34	40.2	18.04	0.28	0.06	10.6	10.05	0.55	31.86	0.25	0.0192	0.779	0.169		0.02	0.372		0.057	99.23
c18-36	42.6	15.7	0.25	0.06	11	10.43	0.57	32.64	0.258	0.0194	0.754	0.141		0.024	0.329		0.051	99
c18-37	44.2	17.99	0.24	0.06	10.9	10.33	0.57	31.73	0.276	0.0206	0.897	0.185		0.025	0.392		0.062	101.24
c18-39	47	22.73	0.1	0.06	9.69	9.18	0.51	30.95	0.238	0.0181	0.675	0.125		0.016	0.316		0.068	98.06
c18-40	48.75	18.81	0.27	0.06	9.99	9.43	0.56	31.64	0.264	0.0186	0.862	0.179		0.018	0.354		0.062	98.14
c18-42	50.5	19.51	0.29	0.06	11.4	10.87	0.53	31.66	0.245	0.0185	0.704	0.142		0.014	0.328		0.062	102.86
c18-44	54	21.41	0.25	0.05	10.2	9.65	0.55	31.35	0.263	0.0186	0.758	0.153		0.017	0.345		0.059	99.65
c18-49	59.4	24.46	0.26	0.06	9.72	9.13	0.59	29.45	0.275	0.0198	0.713	0.151		0.013	0.369		0.062	98.4

Annexe 5.14. Résultats de l'analyse pollinique, carotte Ct9c

Profundus (cm)	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63	65	67	69	71	73	75	77	79	81	
Moisture (mm)	492	416	475	453	332	301	462	326	305	320	342	339	418	350	348	364	360	400	201	311	287	263	550	412	353	440	364	337	308	350	305	350	307	408	301	441	464	496	512	444	437	
ARBRES																																										
ABIES	3	0	7	1	3	2	0	0	0	3	6	3	13	5	7	7	4	7	13	3	4	9	14	13	11	10	25	16	17	16	16	18	22	30	16	32	42	58	66	77	76	
ACER	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ALNUS	30	22	24	24	16	9	5	3	5	6	4	10	6	3	4	10	6	4	10	3	7	1	4	5	6	4	4	2	8	2	3	4	8	3	10	8	11	10	6	6	6	
BETULA	17	20	19	19	15	13	9	4	6	9	18	10	13	5	7	12	9	5	9	5	12	9	5	7	8	7	10	6	4	6	2	3	3	3	8	6	7	2	10	3	3	
BUXUS	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CANNAUDUMULUR	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CARPINUS	8	4	6	8	2	6	1	1	2	3	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CORYLUS	32	27	29	22	32	37	16	17	17	18	14	14	22	15	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	
FRAXINUS	5	2	1	1	0	0	2	0	1	1	0	1	0	2	0	1	2	0	1	0	0	1	2	1	0	0	1	3	1	3	5	1	3	2	1	3	2	4	12	5	2	1
HEDERA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
IRIS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
JUGLANS	0	2	5	3	0	1	1	0	0	1	1	1	2	0	3	3	2	32	0	1	0	0	2	6	3	3	2	2	1	0	4	2	0	1	1	4	3	4	0	1	1	1
JUNIPERUS	0	1	0	1																																						
PICEA	61	37	65	73	43	50	54	32	3	6	5	12	6	7	6	3	9	4	5	5	1	3	3	3	4	2	1	1	1	1	3	3	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1
PINUS	111	89	110	143	73	88	108	82	61	106	59	65	123	84	82	86	85	110	113	120	28	34	92	49	112	102	92	103	114	112	100	115	133	112	132	178	157	129	104	104		
QUERCUS	24	71	72	47	57	65	83	67	73	63	85	63	80	86	85	86	84	82	63	54	50	27	61	65	53	68	78	65	64	66	72	64	72	72	72	32	30	35	45	53	53	
SALIX	17	7	4	1	7	6	13	10	10	6	6	10	6	10	12	10	12	12	6	30	3	9	24	15	13	14	10	13	14	9	15	13	11	11	11	11	11	11	11	11	11	
SAMOLUS	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ULMUS	1	1	0	6	3	7	1	2	1	1	3	3	9	2	1	1	1	0	0	2	3	0	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
VIBURNUM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
HERBACEAE																																										
ALLIACEAE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
AMARANTHACEAE	12	4	4	0	4	3	7	8	1	4	10	9	14	7	9	10	3	7	3	7	14	7	13	10	8	3	6	4	7	3	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
APURINIA	2	2	2	3	1	3	2	1	1	3	1	0	1	3	2	0	1	2	0	1	4	1	3	5	6	0	1	3	2	0	1	3	2	0	1	3	2	0	1	3	2	0
AUTREX RIBACEAE	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
BORRAGINACEAE	10	10	12	5	12	6	11	6	4	5	2	12	6	3	5	8	4	6	3	7	4	5	5	6	4	3	4	5	10	4	2	3	0	1	7	1	0	0	1	0	0	
CALLUNA	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CAMPANULACEAE	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CARDUACEAE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CARYOPHYLLACEAE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CENTAREAE	11	10	6	5	1	3	5	2	4	2	3	2	2	3	6	4	2	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
CERATIA	4	3	5	5	1	2	3	3	2	2	2	1	7	4	2	3	5	5	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
CUCURBITACEAE	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
CONVOLVULACEAE	23	12	9	6	2	6	7	3	4	4	4	4	4	4	8	2	2	3	5	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
ERICACEAE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
FABACEAE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
FABACEAE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
FILICES	2	3	2	0	2	4	5	7	4	3	3	8	6	1	1	1	4	2	0	1	2	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
FILICES	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
GRAMINEAE	4	4	2	0	0	3	1	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
LAMIACEAE	0	1	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PAPAVER	6	2	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
SCARIFOLIACEAE	17	51	42	28	37	43	53	43	31	44	40	46	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	
RUACEAE	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
RUACEAE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0</																	

Annexe 5.15. Diatomées du sédiment de la carotte C19c (nb de frustules/mg de sédiment sec)

Echantillon	no.16	no15	no14	no13	no12	no11	no10	no9	no8	no7	no6	no5	no4	no3	no2	no1
Profondeur (cm)	0.5cm	4.5cm	8.5cm	12.5cm	16.5cm	24.5cm	32.5cm	40.5cm	44.5cm	48.5cm	56.5cm	64.5cm	68.5cm	72.5cm	76.5cm	80.5cm
<i>Achnanthes olveae</i>	1907.4	1144.44	762.96													
<i>Achnanthes flexella</i>	190.74		190.74	1			1									
<i>Achnanthes minutissima</i>			190.74													
<i>Achnanthes rostrata</i>	572.22	190.74	190.74													
<i>Achnanthes sp.</i>		572.22	190.74	1												
<i>Amphora ovalis</i>	190.74															
<i>Amphora pediculus</i>	1144.44	4387.02	2670.36			1	3									
<i>Amphora inaricosis</i>	381.48	572.22	38.14	1		1	1				1					
<i>Amphora sp.</i>	190.74	572.22														
<i>Asterionella formosa</i>	1525.92	1335.18														
<i>Aulacoseira granulata</i>	190.74	190.74														
<i>Aulacoseira islandica subsp. helvetica</i>	1144.44	3051.84	572.22													
<i>Cocconeis disculus</i>		38.14														
<i>Cocconeis pediculus</i>		190.74														
<i>Cocconeis neohumensis</i>		38.14		1												
<i>Cocconeis placentula v. euglypta</i>			190.74		1	2	2	1		1					2	1
<i>Cocconeis placentula</i>	381.48	190.74	190.74													
<i>Cyclotella comensis</i>	572.22	190.74														
<i>Cyclotella cyclopuncta</i>	5340.72		190.74													
<i>Cyclotella distinguenda</i>			38.14	2	3	18	2	2	4	5	4	4	2	3	5	7
<i>Cyclotella ocellata</i>	1335.18															
<i>Cyclotella radiosa</i>	190.74															
<i>Cyclotella sp.</i>	190.74															
<i>Cyclotella cf. wuthrichiana</i>			381.48													
<i>Cyclotella cf. krammeri</i>	1907.4	38.14	381.48													
<i>Cyclotella cf. planktonica</i>			762.96				1									
<i>Cymatopleura solea</i>			190.74													
<i>Cymbella caespitosa</i>								1		1						
<i>Cymbella helvetica</i>									2	1		1				
<i>Cymbella laevis</i>						1										
<i>Cymbella sinuata</i>						1										
<i>Cymbella subaequalis</i>			38.14													
<i>Cymbella ventricosa</i>		38.14														
<i>Cymbella sp.</i>		190.74	381.48			1				1	1			2	1	
<i>Denticula tenuis</i>							1									
<i>Dinornis vulgare</i>	190.74															
<i>Diploneis oblongella</i>			190.74													
<i>Diploneis ovalis</i>			190.74													
<i>Epithemia adnata</i>							1									
<i>Epithemia sorex</i>					1							1				
<i>Eunotia arcus</i>									1	1	1					
<i>Eunotia sp.</i>							1									
<i>Fragilaria brevistriata</i>			190.74													
<i>Fragilaria capucina</i>		38.14					1									
<i>Fragilaria construens</i>	190.74	38.14	190.74	8												
<i>Fragilaria crotonensis</i>	8011.08	2288.88	38.14													
<i>Fragilaria elliptica</i>	190.74	190.74														
<i>Fragilaria parvula</i>			190.74													
<i>Fragilaria pinnata</i>	2861.1	1144.44		1			3	1	2	1	1	1	2	1		1
<i>Gomphonema ang.</i>		38.14	381.48		1	2	1		2	1	2		2	1	1	1
<i>Gyrodinium acuminatum</i>	190.74															
<i>Gyrodinium attenuatum</i>		190.74														
<i>Hantzschia amphioxys</i>														1		
<i>Mastogloia smithii v. lacustris</i>									2	2						
<i>Navicula constans v. symmetrica</i>		38.14														
<i>Navicula cuspidata</i>			190.74													
<i>Navicula exigua</i>		190.74														
<i>Navicula minima</i>	381.48															
<i>Navicula oblonga</i>			190.74													
<i>Navicula radiosa</i>										1						
<i>Navicula scutelloides</i>	190.74	38.14	38.14				1				1					
<i>Navicula subrotundata</i>	190.74	190.74														
<i>Navicula uscula f. minor</i>			190.74													
<i>Navicula sp.</i>	572.22	190.74	190.74	1			1	1	3	2					2	
<i>Neidium bisulcatum v. subamplicatum</i>		38.14														
<i>Nitzschia amphibia</i>		38.14	190.74													
<i>Nitzschia sp.</i>		190.74				1	1									
<i>Opephora risenii</i>		190.74														
<i>Pinnularia sp.</i>	190.74															
<i>Stephanodiscus minutulus</i>	1335.18	3051.84	381.48	1												
<i>Stephanodiscus neosiraes</i>	8011.08	4768.5	190.74													
<i>Stephanodiscus tenuis</i>		190.74														
<i>Synedra acus v. angustissima</i>						2										
<i>Synedra ulna</i>	381.48	190.74					1			1						
<i>Tabellaria fenestrata</i>	381.48	1144.44														
<i>Tabellaria flocculosa</i>			190.74													
Total (frustules/mg sédiment sec)	40627.62	38167.28	10681.4	17	6	30	22	7	19	18	10	8	6	7	12	10