

LE LAC DE NEUCHÂTEL:

Physico-chimie et Turbidimétrie des Eaux.

Concentration, Minéralogie et Granulométrie

des Particules en Suspension.

Thèse présentée à la Faculté des Sciences par

André Bapst

**Géologue diplômé de l'Université de Fribourg
pour l'obtention du grade de Docteur ès Sciences**

IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

Le Lac de Neuchâtel: physico-chimie et
turbidimétrie des eaux. Concentration,
minéralogie et granulométrie des particules
en suspension

de Monsieur André Bapst

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

FACULTÉ DES SCIENCES

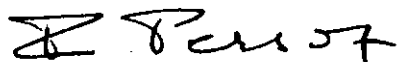
La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel,
sur le rapport des membres du jury,

Messieurs B. Kubler, F. Zwahlen, J.C. Pedrolì,
A. Lambert (EPF-Zurich) et K. Kelts (EAWAG-
Dübendorf)

autorise l'impression de la présente thèse.

Neuchâtel, le 10 décembre 1987

Le doyen:



F. Persoz

à Chantal et Aurélien,

à mes parents,

Tout a jailli de l'eau!
Tout se nourrit de l'eau!

J.W. Goethe

RESUME

Une nouvelle approche du cycle limnologique annuel du lac de Neuchâtel a été abordée par la mise en œuvre de techniques modernes, spécialement focalisées sur l'étude des particules en suspension.

La conjonction des profils spatio-temporels des mesures turbidimétriques et physico-chimiques (Température, O₂ dissous, PH, Conductibilité) a permis de déterminer la concentration et une qualification initiale de la masse particulaire en suspension. L'analyse ultérieure des profils de turbidité, enregistrés avec un nouveau type de diffusiomètre intégrateur limnologique (DIL), nous a conduit à élaborer un schéma évolutif de la stratification particulaire annuelle de la colonne aquatique:

Ainsi, une couche benthique néphéloïde (BNL = BENTHIC NEPHELOID LAYER) existe à l'échelle locale ou régionale. A la base de l'épilimnium, une couche claire (CWL = CLEAR WATER LAYER) très mince en début d'été, s'amplifie ensuite à une vitesse voisine de 1 m/jour. Celle-ci a été assimilée à la vitesse de sédimentation particulaire totale car elle correspond à l'enfoncement estival de la couche pélagique néphéloïde (PNL = PELAGIC NEPHELOID LAYER) sous-jacente.

L'implantation temporaire d'un piège à sédiment, par 100 m de fond au large de Neuchâtel, nous a permis de formuler une moyenne annuelle pour le flux particulaire total (4.2 g/m²·jour) et pour le taux de sédimentation (2 mm/an).

Les analyses des particules ont nécessité de multiples adaptations méthodologiques: la concentration a été déterminée par la pesée des résidus de filtration; la granulométrie a été obtenue par Compteur Coulter; la minéralogie a été identifiée par Diffraction des RX et par Microscopie électronique à Balayage reliée à une Microsonde à Energie dispersive.

La combinaison de tous ces résultats, joints aux analyses chimiques des particules récupérées dans les pièges, nous a permis:

- d'identifier 3 populations minéralogiques principales (allogènes, biogènes et endogènes ou parfois authigènes) réparties dans 2 modes granulométriques distincts (vers 5 µm et entre 10-15 µm).

- d'individualiser tout au long de l'année 4 masses aquatiques correspondant approximativement aux 4 aires morphologiques du lac.

- d'apprécier les disparités minéralogiques saisonnières des suspensions. Les particules biogènes (kystes de diatomées) et endogènes ou authigènes (carbonates, oxalates et phosphates de calcium) prédominent vers la fin du printemps et en été. Les minéraux allogènes (argileux et silicatés) les supplantent dès l'automne.

- de mettre en évidence l'existence locale et temporaire de resuspensions sédimentaires par la similitude des particules d'interface avec celles qui se trouvent simultanément en suspension.

SUMMARY

A new approach to the annual limnological cycle of the lake of Neuchâtel has been taken up with the use of modern engineering, especially designed for the study of suspensions.

The conjunction of space and temporal profiles of turbiditical and hydrological measures (Temperature, dissolved Oxygen, pH and Conductibility) has allowed us to determine the concentration and the initial qualification of the suspensions. The subsequent analysis of the turbiditic profiles, recorded with a new model of limnological integrator diffusiometer (DIL), has allowed the development of a new evolution sketch of the annual particles stratification of the water column:

So, a BENTHIC NEPHELOID LAYER (BNL) exists in a local or regional space. At the bottom of the epilimnium, a CLEAR WATER LAYER (CWL), very thin in the beginning of the summer, thickens then with a velocity of nearly 1 m/day. This has been linked with the velocity of the total particles sedimentation because it corresponds to the summer descent of the PELAGIC NEPHELOID LAYER (PNL).

Some sediment traps have been temporarily placed in the middle of the lake, off Neuchâtel where there is a depth of 100 m. These have allowed the formulation of an annual mean for the total settling flux (4.2 g/m²·day) and for the sedimentation rate (2 mm/year).

The analyses of particles have required many methodological adaptations: the concentration has been determined by the weight of the filtration residues; the granulometric curves have been obtained by Counter Coulter; the minerals have been identified by X-ray Diffraction, by Scanning Electron Microscopy and Energy-dispersive X-ray analysis.

The total results of these measures, along with chemical analyses of particles sampled by sediment traps, have allowed:

- the identification of 3 principal mineralogical populations (allogenic, biogenic and endogenic, or sometimes authigenic) shared out 2 distinct granulometric modes (to 5 μ m and between 10-15 μ m).
- the differentiation of 4 aquatic bodies throughout the year which correspond approximatively to the 4 morphological areas of the lake.
- the assesment of the seasonal mineralogical disparities of the suspensions. The biogenic (diatoms cysts) and endogenic or authigenic particles (calcium carbonates, oxalates and phosphates) prevail towards the end of the spring and during the summer. The allogenic minerals (clays and silicates) dominate from the autumn onwards.
- the determination of local and temporary sedimentary resuspensions by the similarity of the interface particles with those that are simultaneously in suspension.

REMERCIEMENTS

La recherche limnologique constitue un domaine privilégié des études pluridisciplinaires. L'élaboration de ce travail a nécessité la collaboration de nombreuses personnes et il me tient à coeur de les remercier aujourd'hui.

Tout d'abord, le Professeur B. KÜBLER m'a proposé ce passionnant sujet de recherche et a bien voulu accepter la direction de cette thèse. Il m'a permis d'utiliser toutes les ressources de son laboratoire et d'acquérir de nouveaux appareils qui se sont révélés très performants; il m'a soutenu tout au long de ce travail avec intérêt mais aussi avec toute la rigueur de son jugement scientifique. Je le remercie également pour ses remarques et critiques qui m'ont permis de donner à ce manuscrit sa forme définitive.

Le Docteur K. KELTS, géologue à l'EAWAG/ETH de Dübendorf et le Docteur A. LAMBERT, géologue au VAW/ETH de Zürich, ont accepté de faire partie de mon jury de thèse. Ils ont lu et critiqué ce travail avec enthousiasme; je leur exprime ici toute ma reconnaissance.

Le Professeur F. ZWAHLEN, directeur du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, a participé à la correction du manuscrit en faisant partie du jury. Il m'a donné d'utiles conseils pour son élaboration finale; qu'il en soit remercié.

Ce fut également une grande joie pour moi de compter parmi les membres du jury le Docteur J.-C. PEDROLI, grand connaisseur de tous les secrets du lac de Neuchâtel.

Je voudrais aussi remercier très chaleureusement:

F. STRAUB, biologiste, qui m'a aidé à déterminer les diverses espèces de diatomées qui foisonnent à certaines époques parmi les suspensions minérales.

Le Professeur W. FORM, J. FORCHELET, R. PRESSL-WENGER et J.P. TARDENT, de l'Institut de Métallurgie Structurale de l'Université de Neuchâtel, qui m'ont permis d'accéder à leur Microscope Electronique à Balayage et qui n'ont ménagé ni leur temps ni leur peine lors des multiples heures de travail.

Mme B. POKORNI et M. J.-M. LIECHTI, du Service Cantonal de la Protection de l'Environnement du canton du Neuchâtel, ainsi que les 2 "capitaines" R. Colliard et M. Devaud, qui m'ont permis d'embarquer sur leur bateau à plusieurs reprises.

Tous les membres du groupe de recherche océanographique PROSPER, F. Nyffeler, C.-H. Godet, P. Rûch et plus tard E. Zuur, qui m'ont fait bénéficier de leurs expériences du grand large et de divers soutiens techniques et informatiques.

Le Centre de Calcul de l'Université de Neuchâtel et ceux qui m'ont initié aux balbutiements informatiques, D. Zweidler et C. Wacker.

A. Collaud, qui m'a confectionné ou modifié avec dextérité plusieurs appareils limnologiques.

Tous mes collègues et amis de l'Institut de Géologie et plus spécialement ceux qui m'ont accompagné plusieurs fois sur le lac, C. Beck, M. Ramseier, J.-M. Vuitel, E. de Kaenel et P. Perrochet.

Les techniciens, laborants et apprentis du LMPG, qui m'ont secondé avec plaisir et assiduité sur le lac et au laboratoire.

D'autres personnes m'ont apporté leur soutien par leur amitié et des discussions fructueuses. Elles voudront bien me pardonner de ne pas les avoir citées, mais qu'elles soient assurées de ma sincère sympathie.

Enfin, je pense à mes parents, qui m'ont toujours et patiemment encouragé tout au long de mes études, à Aurélien qui m'a offert ses premières sourires durant la rédaction de ce mémoire et surtout, je pense à Chantal, mon épouse, qui a vécu à mes côtés toute l'aventure de cette thèse.

Ce projet a été soutenu financièrement par le Fonds National Suisse pour la Recherche Scientifique (Requêtes n° 2.893-0.83; 2.311-0.84; 2.639-0.85; 2.076-0.86).

AVANT-PROPOS

En plus des substances dissoutes, les eaux lacustres contiennent des matières en suspension, de toutes tailles et de toutes formes, minérales ou organiques, vivantes ou détritiques, de nature biogénique, terrigène ou éolienne. Dans notre travail, nous nous sommes essentiellement concentré sur le seston, c'est-à-dire sur les particules dénuées d'une mobilité propre suffisante, par opposition au necton, qui comprend tous les organismes capables de lutter contre les courants (Ivanoff, 1972). Les techniques d'étude du seston se limitent aux particules inférieures à quelque 100 μm . Elles s'appliquent aux particules vivantes telles que les bactéries et le phytoplancton, aux détritiques de petite taille et aux particules minérales dont les dimensions sont telles que leur vitesse de sédimentation est très lente (Ivanoff, 1972).

La distinction entre matières en suspension et substances dissoutes est arbitraire car il y a passage graduel des unes aux autres. En général, on appelle actuellement particules en suspension toutes celles qui sont arrêtées par un filtre dont les pores ont un diamètre minimal de 0.45 μm . Il est cependant vraisemblable qu'une telle membrane retient des particules plus petites à mesure qu'elle se colmate.

Les matières en suspension interviennent dans de nombreux domaines limnologiques tels que la géochimie, la physico-chimie, la géodynamique ou encore la biologie aquatique. Elles présentent une importance vitale pour les nombreux organismes qui se nourrissent en filtrant l'eau et en retenant tout ce qui est susceptible d'être assimilé. Elles favorisent par ailleurs le développement des bactéries.

Les mécanismes de sédimentation sont tributaires de l'état de fractionnement des matières en suspension. Les sédiments étant formés par les particules en suspension arrivées au terme de leur chute, leur constitution dépend directement de tous les processus chimiques, physico-chimiques et biochimiques qui accompagnent cette lente descente vers le fond.

C'est pourquoi, il nous a paru indispensable de mesurer l'évolution physico-chimique verticale de la colonne aquatique du lac de Neuchâtel conjointement aux analyses quantitatives, granulométriques, minéralogiques et géochimiques des particules en suspension. Toutes ces approches ont été conduites sur des variables spatio-temporelles (diversités régionales et saisonnières). Elles devaient non seulement cerner la compréhension du comportement interne d'un cycle limnologique annuel (processus biologiques, physico-chimiques et géochimiques), mais également reconnaître les mécanismes de dispersion des apports détritiques, définir certains paramètres de sédimentation annuelle (flux particulaire, taux de sédimentation) et tenter de distinguer les diverses masses d'eau du lac.

TABLE DES MATIERES

I. INTROOUCTION.....	1
I.1. Le lac de Neuchâtel.....	1
A. Morphométrie.....	1
B. Morphologie.....	1
C. Origine.....	1
D. Bassin d'alimentation.....	2
E. Sédiments.....	3
F. Géochimie de l'eau.....	4
I.2. Les campagnes d'étude.....	6
A. L'échantillonnage.....	6
B. Les mesures physico-chimiques et turbiditiques.....	7
I.3. L'approche analytique.....	8
II. PHYSICO-CHIMIE DE L'EAU.....	10
II.1. Présentation de l'appareil de mesures et du traitement des résultats.....	10
II.2. Présentation et discussion des résultats.....	11
A. La température.....	11
B. La concentration en oxygène dissous.....	14
C. Le PH.....	17
D. La conductibilité.....	20
E. Conclusion.....	23
III. TURBIDIMETRIE.....	24
III.1. La concentration particulière.....	24
A. Méthodologie.....	24
B. Résultats.....	24
C. Discussion.....	24
III.2. Le turbidimètre.....	27
A. Le principe de mesure.....	27
B. L'étalonnage.....	27

III.3. Observations et définitions.....	29
III.4. Résultats et discussion.....	30
A. L'épilimnium.....	30
B. L'hypolimnium.....	31
III.5. Conclusion.....	35
IV. DYNAMIQUE DES PARTICULES EN SUSPENSION.....	38
IV.1. Méthodologie.....	38
IV.2. Détermination du flux particulaire et du taux de sédimentation.....	39
IV.3. Le flux particulaire dans le lac de Neuchâtel.....	41
IV.4. Le taux de sédimentation dans le lac de Neuchâtel...	42
V. GRANULOMETRIE DES PARTICULES EN SUSPENSION.....	43
V.1. Introduction.....	43
V.2.Méthodologie: Le Compteur Coulter.....	43
A. Le principe du compteur à résistance.....	44
B. La constitution du compteur à résistance.....	44
C. Les meures.....	44
V.3. Granulométrie.....	45
A. Granulométrie des échantillons prélevés par bouteille océanographique.....	45
B. Granulométrie des échantillons prélevés par collecteurs de sédiment.....	49
V.4. Essai de caractérisation du flux particulaire à partir des analyses granulométriques.....	50

VI. MINÉRALOGIE DES PARTICULES EN SUSPENSION.....	54
VI.1. Introduction.....	54
VI.2. Procédures expérimentales.....	54
VI.3. Les associations minéralogiques.....	55
A. Les particules d'origine essentiellement allochtone.....	56
1. Les minéraux argileux.....	56
2. Le talc.....	59
3. Les minéraux silicatés.....	59
4. Discussion.....	60
B. Les particules d'origine essentiellement autochtones.....	60
1. Les carbonates de calcium.....	60
2. Les oxalates de calcium.....	62
3. Les phosphates de calcium.....	65
4. Les sulfates et les formates de calcium.....	71
C. Les particules d'origine essentiellement biologique.....	74
D. Particularités minéralogiques des matières en suspension prélevées par collecteurs de sédiments.....	75
VI.4. Conclusion.....	77
VII. GEOCHIMIE DES PARTICULES EN SUSPENSION.....	79
VII.1. Méthodologie.....	79
A. Introduction.....	79
B. Méthodes analytiques.....	79

VII.2. Géochimie des particules et du sédiment.....	80
A. Covariation interélémentaire de Fe-Mg-Mn-K-Al Cu-Ni.....	82
B. Covariation de Fe-Mg-Mn-K-Al-Cu-Ni avec SiO ₂	82
C. Covariation des éléments des alumino-silicates avec le Résidu Insoluble (RI).....	82
D. Covariation des éléments très sensibles à l'attaque HCl.....	84
E. Le Carbone Organique.....	84
F. Cae des phosphates acido-solubles.....	85
G. Cae du Strontium.....	86
VII.3. Essai de détermination du flux sédimentaire du phosphore acido-soluble.....	86
VII.4. Conclusion.....	87
VIII. CONCLUSION GENERALE.....	88
BIBLIOGRAPHIE.....	92

I. INTRODUCTION

I.1 Le Lac de Neuchâtel

A. Morphométrie

Situé sur la bordure septentrionale du bassin molassique suisse, le lac de Neuchâtel représente une superficie de 214.6 km². Depuis la dernière correction des eaux du Jura, son altitude moyenne, appareillée à celle des lacs de Morat et Biennne, est maintenue artificiellement à 429.3 m par le barrage de Nidau-Port. De forme plus ou moins rectangulaire, son axe principal est orienté dans la direction SW-NE. Sa longueur maximale atteint 38.3 km et sa largeur moyenne vaut 5.68 km. Au Sud de la Pointe du Grain (Bevaix), il présente sa plus grande profondeur avec 153 m. Le lac occupe un volume de 13.77 km³ avec une profondeur moyenne de 64.2 m.

Le séjour moyen de l'eau dans le lac est très long; il est équivalent au quotient du volume lacustre par le débit moyen de l'émissaire. Il dure 8 ans et 82 jours. D'autres éléments morphométriques figurent dans la thèse de Sollberger (1974).

B. Morphologie

L'importante particularité bathymétrique du lac de Neuchâtel est représentée par la Motte, colline sous-lacustre qui s'élève jusqu'à 9 m de la surface. Son orientation identique à celle du lac permet de le subdiviser en deux vallées bien distinctes. Elle atteint son point culminant à quelque 2.7 km à l'ESE de l'embouchure de l'Areuse (Fig. 1).

Bien que la Motte n'individualise qu'imparfaitement de véritables bassins, son relief est suffisant pour délimiter certaines aires sédimentologiques. Nous verrons plus tard que celles-ci peuvent temporairement définir 4 masses d'eau propres caractérisées par leur physico-chimie et la nature de leurs particules en suspension. Ce sont:

- le bassin de Neuchâtel, regroupant le bas-lac peu profond et la cuvette qui dépasse 100 m de profondeur, au NW, N et NE de la Motte.
- la vallée Nord, sur la rive gauche, de Concise à l'embouchure de l'Areuse.
- la vallée Sud, sur la rive droite, d'Yvonand à Portalban, mais dont la vallée n'est bien individualisée qu'à partir de Chevroux.
- le haut-lac, partie rétrécie d'Yvonand à Yverdon.

C. Origine

Toutes les discussions qui ont eu cours sur l'origine du lac résument étroitement l'historique des études qui s'y sont rapportées. Dans son important travail, Sollberger (1974) présente l'évolution des idées qui se sont succédées depuis le milieu du 19^{ème} siècle et les doutes qui subsistent encore sur la formation du lac de Neuchâtel. Tantôt attribuées à une érosion fluviale ou glaciaire, tantôt

reliée à des phénomènes tectoniques alpins ou jurassiens, l'origine de la dépression actuelle du lac ne comporte toujours pas d'explication unilatérale. Actuellement, de nombreuses investigations sismiques ont été réalisées sur plusieurs lacs suisses. Il semble toutefois qu'aucune explication génétique globale ne peut être retenue pour l'ensemble de ces lacs. Plusieurs auteurs y voient généralement une érosion glaciaire superposée à des zones de faiblesse ou de failles dans le "bedrock" (Finckh et al., 1984).

Cependant, en se rapportant à une étude sismo-séquentielle des sédiments quaternaires et actuels du lac de Neuchâtel réalisée par M.-A. Béatrix, Kübler (Rapport interne, 1985) y verrait plutôt une origine fluviale. En effet, le toit du substratum, essentiellement molassique, ne présente jamais de profils en "U" caractéristiques d'érosion glaciaire. Au contraire, des profils en "V", typiques de vallées fluviales, y sont systématiques et demeurent même dans les petites vallées transversales. Malgré la profondeur considérable des premières séquences sédimentaires situées à 50 m au-dessus du niveau marin et les problèmes inhérents qu'elle cause à la compréhension des écoulements du pied du Jura jusqu'à la confluence du Rhin où aucune paléo-vallée fluviale n'a encore été identifiée si profondément, la conservation de ces formes pré suppose leur protection durant le surcreusement glaciaire d'une ou de plusieurs glaciations postérieures. Les cartes du substratum en isochrones ou en altitudes calculées (Fig. 2) prouvent l'existence d'une vallée profonde qui suit le pied du Jura, s'infléchit vers l'Est à l'aval de la Motte, et dont la pente du Thalweg indique un écoulement vers le NE. Elle est la continuation de la paléo-vallée de l'Orbe et se poursuit sous les Grande-Maraîs en infléchissant son cours vers l'Est à l'aval du Mont-Vully. Il faut enfin remarquer que ces changements de direction se produisent toujours en aval d'une colline molassique. Leur origine tectonique ne demeure toutefois que fortement suspectée.

D. Bassin d'alimentation

Le bassin d'alimentation du lac de Neuchâtel s'étend sur le Jura et le Plateau suisse. Il occupe une superficie de 2672 km², unissant les bassins versants des lacs de Morat, de Joux, des Rousses, Brenet et des Taillères à son propre domaine de drainage. Près du tiers de sa superficie est recouvert de forêts. Le Mont-Tendre (1648 m) est le point le plus élevé. Le 26.7 % de la surface du bassin d'alimentation est à une altitude supérieure à 1000 m (Portner, 1951). Par conséquent, la répartition des précipitations n'est pas uniforme sur l'ensemble du bassin. La zone jurassienne reçoit annuellement 110 à 175 cm de précipitation tandis que la zone du plateau en reçoit 90 à 110 cm. Le volume des précipitations annuelles sur le bassin (122 cm en moyenne) représente environ le quart du volume d'eau du lac. Mais seule la moitié de cette eau parvient au lac, l'autre partie étant évaporée (Quartier, 1948).

Tout comme pour les précipitations, le bassin versant du lac de Neuchâtel peut être subdivisé en deux domaines géologiques et hydrologiques différents. Le Jura formé de calcaires et de marnes possède une hydrologie karstique

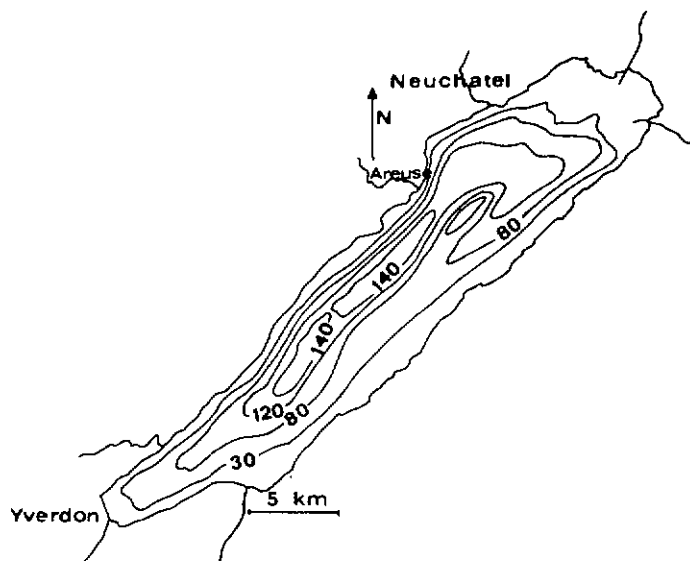


FIG. 1: Carte bathymétrique du lac de Neuchâtel.

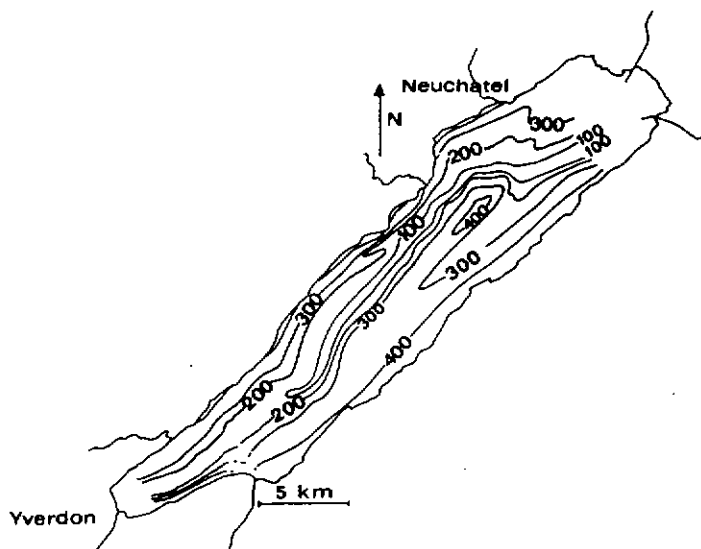


FIG. 2: Carte du toit du substratum en altitudes compensées (selon M.-A. Bétrix, in Kübler, Rap. int., 1985).

tandis que la molasse du plateau, constituée de grès, de marnes et de conglomérats, est recouverte de dépôts glaciaires et fluvioglaciaires.

Le lac est alimenté par 79 rivières et ruisseaux (Sollberger, 1974) dont les principaux sont la Thielle à Yverdon (débit moyen = 15 m³/s), l'Areuse (12.2 m³/s) et le canal de la Broye (11 m³/s). Le canal de la Thielle, seul émissaire du lac, accuse un débit moyen de 53.1 m³/s. Il arrive parfois que la Thielle coule en sens inverse et refoule dans le lac de Neuchâtel (Pokorni, 1983).

E. Sédiments

Le lac repose sur la molasse du Plateau suisse, sur des dépôts morainiques et fluvioglaciaires et sur les contreforts extrêmes de la chaîne calcaire jurassienne. Son orientation privilégiée, parallèle aux directions des vents dominants (Nord-Est et Sud-Ouest), favorise une homogénéisation dynamique en fonction de la bathymétrie et des aires sédimentaires. L'absence de rivières importantes détermine de faibles apports alloctones de terrigènes détritiques. De plus, la sédimentation carbonatée autochtone se différencie parfaitement des sables et des limons d'origine molassique, morainique ou fluvio-glaciaire déposés sur les rives.

Selon la teneur en carbonates autochtones et la granulométrie des dépôts, trois grandes aires sédimentaires ont été définies (Kübler et al., 1979; Kübler, Rapport interne, 1985), (Fig. 3):

- Un plateau continental, de 0 à 20 m, soumis à l'action des vagues, constitué essentiellement de sables et de limons. La sédimentation carbonatée autochtone y est très faible.

- Un talus continental, épargné de l'agitation causée par l'action des vagues. La sédimentation carbonatée y atteint son maximum.

- Une plaine bathyale généralement plus profonde que 100 m. Il s'y sédimente les particules les plus fines qui sont surtout argilo-carbonatées. De plus, une zone mixte, entre une vallée profonde et un plateau, a été identifiée dans la partie Sud - Sud-Est du lac, entre 60 et 80 m de profondeur.

Dans les trois aires sédimentaires, des dépôts d'origine organique accompagnent les particules minérales et se distribuent selon le même modèle granulométrique; les particules planctoniques prédominent en zone bathyale, elles sont diluées par la sédimentation carbonatée sur le talus et seuls les grands fragments alloctones d'origine xylo-herbacée sont susceptibles de se déposer sur le plateau.

Ce modèle général doit toutefois être modifié pour le sommet de la Motte et pour les rives du lac où la profondeur n'excède pas 10 m. En effet, l'isolement de la Motte par rapport aux régions littorales et sa culmination à quelques mètres au-dessous du niveau du lac permet la formation de craie lacustre. Celle-ci contient plus de 90 % de CaCO₃ (Portner, 1951; Beck, 1987). A proximité des rives, la précipitation carbonatée augmente jusqu'à des profondeurs de

6 à 9 m (Portner, 1951). Il peut ainsi se former des particules de calcite suffisamment grosses pour échapper à l'intense hydrodynamisme de ces zones et enrichir le sédiment côtier en matériel carbonaté. Dans les régions profondes et semi-profondes, le sédiment est formé de dépôts homogènes, dépourvus de traces indicatrices des couches annuelles. Vers 1950, il devenait gris-noir à 10 cm de l'interface (Portner, 1951). Depuis lors, la dégradation s'est accélérée et les analyses de 1961 soulignent son enregistrement dans les dépôts sédimentaires. La publication d'une carte de répartition des sulfures met en évidence les zones les plus atteintes et leur corrélation avec des sources de pollution (Sollberger, 1974). En 1978, l'analyse géochimique et granulométrique de 18 échantillons prélevés par bennage a permis d'élaborer des lois naturelles de distribution des éléments. Elles seraient de 2 types: fort gradient teneurs-profondeurs dans la zone agitée, faible gradient dans la zone calme profonde (Kübler et al., 1979). Les atteintes de la pollution seraient alors mesurées par l'écart des teneurs élémentaires comparées à celles prévues par les lois naturelles et par les écarts aux régressions normales entre éléments de même affinité. Les composantes qui sont apparues les plus caractéristiques de la pollution anthropique sont le phosphore, le fer et le zinc extraits par attaque à l'acide chlorhydrique. Grâce à l'orientation du lac (parallèle aux vents dominants) et à ses configurations géométriques (grande surface pour une faible profondeur), les eaux sont régulièrement bien oxygénées jusqu'à l'interface sédimentaire (Bapst et Kübler, 1987). Les particules organiques fines qui se déposent essentiellement dans la plaine profonde subissent donc une première dégradation dans la colonne d'eau. Par contre, des conditions de conservation apparaissent dans le sédiment, au-delà de la micro-couche oxydée de quelque 5 mm d'épaisseur. L'initiation de ce milieu réducteur qui atténue fortement l'évolution de la matière organique peut être illustrée par la prépondérance systématique des acides fulviques, moins évolués, sur les acides humiques des sédiments superficiels du lac (Beck, 1987).

F. Géochimie de l'eau

L'évolution chimique locale et mensuelle des différentes couches aquatiques du lac a été suivie et traitée depuis plusieurs décennies par le Laboratoire Cantonal de Neuchâtel, devenu le Service Cantonal de la Protection de l'Environnement (S.C.P.E.). Le travail de Sollberger (1974) et la compilation statistique de plusieurs milliers de résultats analytiques par Dubois et Schetty (1977) constituent une abondante source de références historiques sur la connaissance du lac depuis 1957. Actuellement, les rapports internes du S.C.P.E. (Pokorní, 1983; 1984) s'intéressent particulièrement à l'état sanitaire de l'eau. L'observation systématique de la thermique, des formes du phosphore, de la concentration en oxygène dissous, des chlorures et de la bactériologie a permis de conditionner l'élaboration de nouvelles lois pour juguler la dégradation progressive du lac de Neuchâtel et pour le maintenir dans un état encore satisfaisant. Il nous paraît nécessaire d'évoquer brièvement quelques

particularités géochimiques de la masse d'eau lacustre qui constitue le support physique des particules en suspension et avec lesquelles elle est continuellement en interaction.

- Selon les analyses du S.C.P.E. (Pokorni, 1983; 1984), les concentrations mensuelles moyennes du phosphore total ont atteint leur maximum à la fin des années 70. Elles se sont actuellement stabilisées aux environs de 40 $\mu\text{g/l}$. Durant les années 1982 et 1983, elles oscillaient entre 25 et 60 $\mu\text{g/l}$ avec de fortes fluctuations saisonnières dans l'épilimnion qui contrastent avec une meilleure stabilité hypolimnionique (Fig. 4). De plus, en individualisant les orthophosphates, directement assimilables par les algues, il est aisé d'observer que c'est cette forme du phosphore qui subit l'épuisement épilimnionique printanier (Fig. 5). Durant la période estivale, ils demeurent même quasiment nuls. En hiver, leur concentration augmente à nouveau et oscille autour de 30 $\mu\text{g/l}$. Dans l'hypolimnion, au contraire, les variations des moyennes mensuelles sont très peu marquées.

- D'après la même source d'informations (Pokorni, 1983; 1984), la concentration moyenne des chlorures augmente régulièrement, tout en demeurant fort éloignée des seuils critiques. Elle a dépassé le niveau des 7 mg/l durant la dernière décennie, alors qu'elle n'atteignait encore qu'environ 4 mg/l vers 1960 (Sollberger, 1974). L'analyse de nos échantillons provenant des filtrats du résidu particulaire étudié dans ce travail fournit une appréciation pour l'année 1984. Vers la mi-juin, la concentration moyenne d'une quinzaine d'échantillons prélevés à toutes profondeurs et à diverses stations fort éloignées les unes des autres s'élève à 8.45 mg/l. Le 4 juillet, la moyenne de 50 prélèvements répartis sur l'ensemble de la masse d'eau du lac atteint 8.30 mg/l. Les variations entre les stations et la profondeur d'échantillonnage sont très faibles. L'évolution mensuelle moyenne de 18 prélèvements de plein lac est très stable (Fig. 6). Par contre, elle contraste fortement avec la teneur des chlorures qui règne dans les affluents et l'émissaire de la Thielle (Fig. 6).

- Les sulfates ont également subi une légère augmentation depuis 1960 où leur moyenne avoisinait 13 mg/l (Sollberger, 1974); les écarts régionaux étaient alors assez prononcés. En 1984, la moyenne mensuelle de juillet s'élève à 15.5 mg/l et aucun des 50 prélèvements ne présente une mesure au-delà de ± 1 mg/l par rapport à cette concentration. Durant les mois de mai, septembre et décembre, les mesures sont très stables autour de leur moyenne respective de 15.7, 14.4 et 14.8 mg/l.

- La concentration des silicates augmente sensiblement avec la profondeur et atteint son maximum à proximité de l'interface sédimentaire (Fig. 7). Chaque station présente individuellement un appauvrissement de surface jusqu'en automne; l'enrichissement enregistré à 1 m du fond est proportionnel à la bathymétrie de la station. De plus, à une profondeur déterminée, les silicates ont une concentration remarquablement homogène sur toute la surface du lac. L'abaissement printanier et estival de la teneur moyenne de plusieurs échantillons épilimniques s'expliqua aisément par la prolifération diatomique qui absorbe de grandes quantités de silice. Dès la fin du cycle

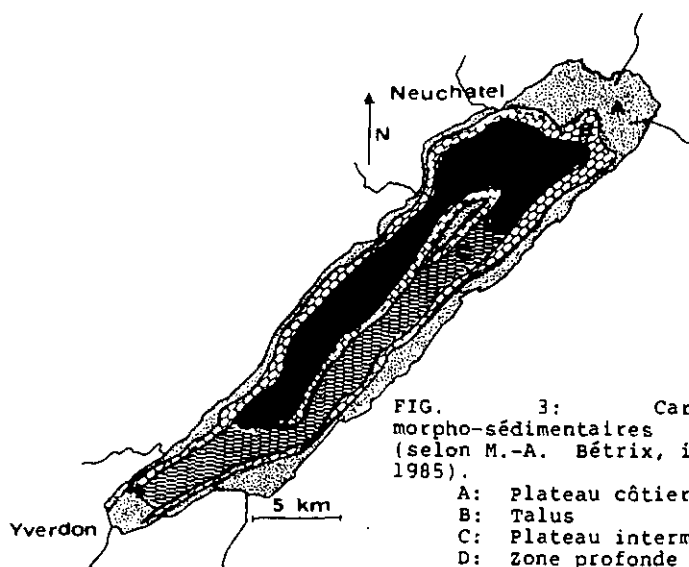


FIG. 3: Carte des zones morpho-sédimentaires du lac de Neuchâtel (selon M.-A. Bétrix, in Kübler, Rap. int., 1985).

- A: plateau côtier
- B: Talus
- C: Plateau intermédiaire
- D: Zone profonde

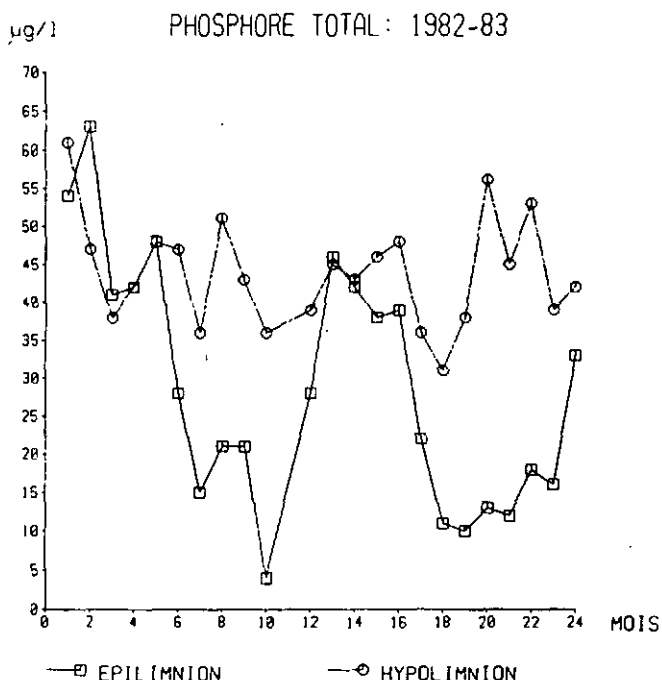


FIG. 4: Evolution annuelle de la concentration moyenne du Phosphore total dans l'épilimnion et l'hypolimnion durant les années 1982 et 1983, sur le site de plus grande profondeur, au large de la Pointe du Grain (selon Pokorny, 1984).

$\mu\text{g/l}$

ORTHOPHOSPHATES: 1982-83

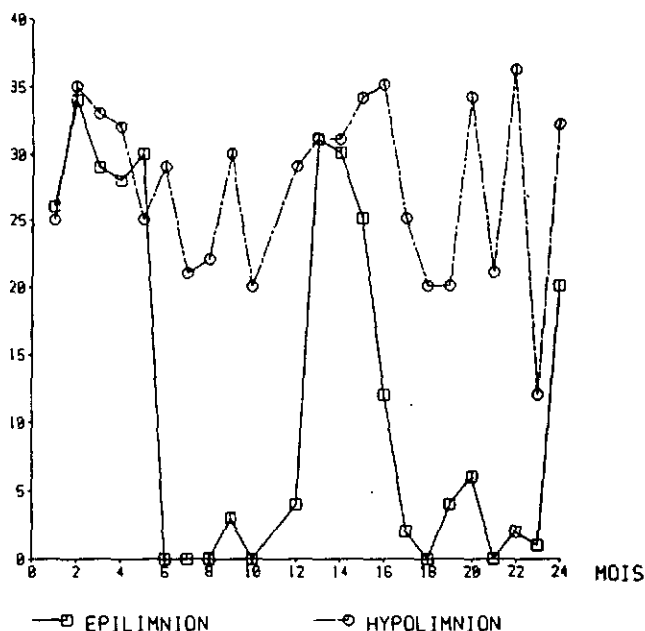


FIG. 5: Evolution annuelle de la concentration moyenne des orthophosphates dans l'épilimnion et l'hypolimnion durant les années 1982 et 1983, sur le site défini en FIG. 4 (selon Pokorny, 1984).

 mg/l

CHLORURES: 1984

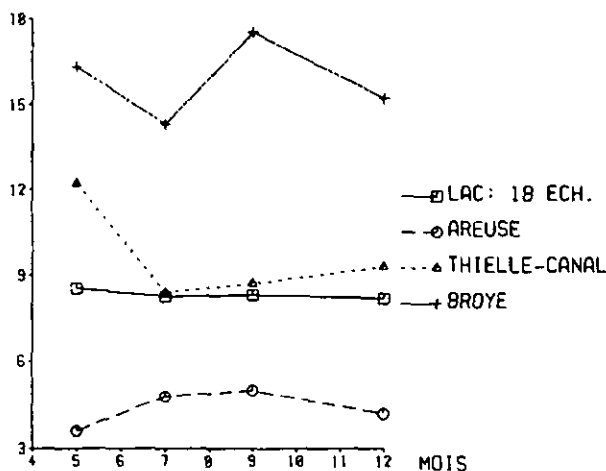


FIG. 6: Concentration des chlorures dans le lac, l'émissaire de la Thielle et 2 affluents durant l'année 1984.

biologique, la concentration de surface retrouve un niveau plus élevé, comparable à la teneur annuelle des eaux profondes.

- L'approche de l'évolution de la teneur des eaux en cations majeurs ne devient intéressante qu'après une étude systématique et approfondie qui sortirait du cadre de ce travail. C'est pourquoi nous n'avancerons que quelques moyennes générales et indicatives. Ainsi, le calcium peut varier saisonnièrement entre 40 et 55 mg/l. Le magnésium est beaucoup plus stable aux alentours de 6.0 mg/l. Les moyennes respectives du sodium et du potassium s'approchent de 3.8 et de 1.8 mg/l. Elles montrent toutefois une sensible augmentation depuis les années 1958 - 1961 lorsqu'elles étaient évaluées à 2.8 et 1.5 mg/l (Sollberger, 1974).

I.2 Les campagnes d'étude

A. L'échantillonnage

1. Neuf campagnes mensuelles d'échantillonnage d'eau se sont déroulées d'avril 1984 à mars 1985 (Tableau 1). Chacune d'entre elles était subdivisée en deux parties, 11 échantillons étant récoltés autour du lac et 13 autres sur le lac proprement dit (Fig. 8).

TABLEAU 1: Calendrier des campagnes d'échantillonnage

A. PERILACUSTRE		B. LACUSTRE
1.	27.04.84	----
2.	25.05.84	22.05.85
3.	15.06.84	12.06.84
4.	09.07.84	04.07.84
5.	03.08.84	06.08.84
6.	07.09.84	14.09.84
7.	02.11.84	12.11.84
8.	07.12.84	05.12.84
9.	----	13.03.85

1.a: Tout d'abord, 6 prélèvements étaient effectués à l'embouchure des principaux affluents (Areuse [b1], Arnon [b2], Thielle [b4], Mentue [b5], Broye [b9]) et dans l'émissaire de la Thielle [b10]. Les 5 autres prélèvements périlacustres proviennent des stations de pompage d'eau alimentaire (Neuchâtel [b0], Grandson [b3], Estavayer [b6], Portailban [b7], Cudrefin [b8]). Leur crépine d'aspiration est toujours située à 35 - 40 m de profondeur et à quelques centaines de mètres au large de chacune des localités. Tous les prélèvements ont pu être effectués sur de l'eau brute, n'ayant pas encore subi de traitements nécessaires à sa transformation en eau de boisson.

1.b: Conjointement à ce circuit, la campagne lacustre était conduite à bord du bateau du S.C.P.E. du canton de

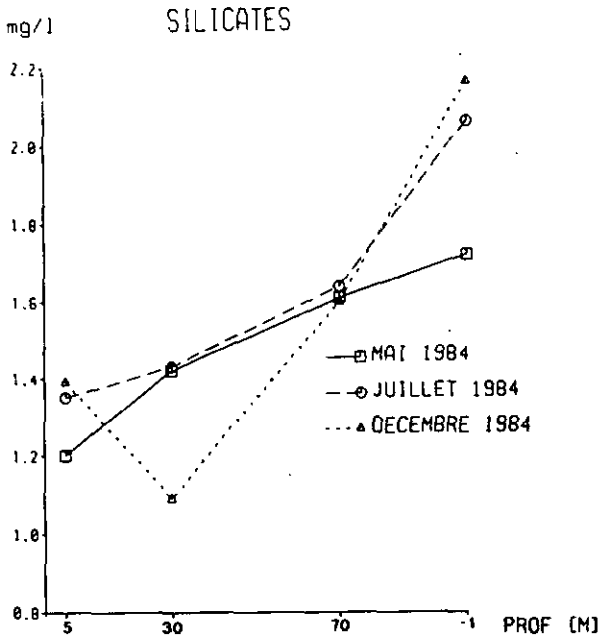


FIG. 7: Concentration des silicates selon la profondeur des prélèvements durant les mois de mai, juillet et décembre 1984.

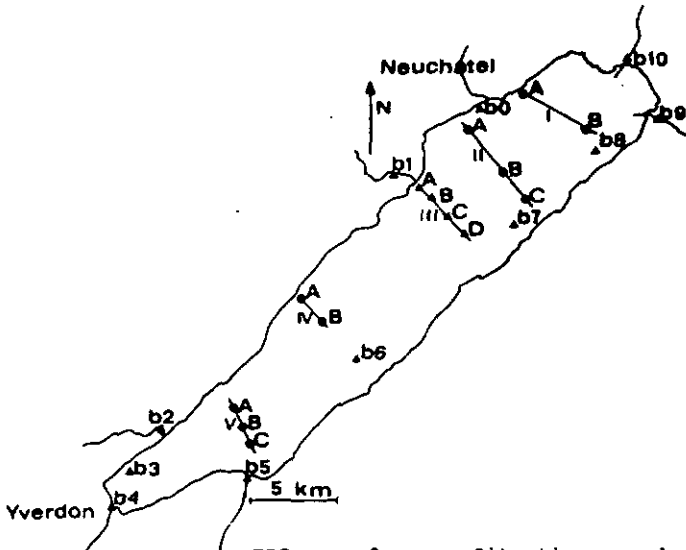


FIG. 8: Situation des points d'échantillonnage mensuel (▲) et de ceux de la couverture du lac le 4 juillet 1984 (●).

Neuchâtel. Les 4 sites d'échantillonnage forment un profil transversal (No III) entre l'embouchure de l'Arsusa et la rive fribourgeoise, entre Chevroux et Portalban. Les 13 prélèvements de 10 litres, réalisés avec une bouteille océanographique "Niskin", sont effectués à 5 m de la surface, à 1 m du fond et, selon la profondeur des sites, à 30 m et à 70 ou 80 m. La situation des 4 points (Fig. 8) regroupe l'embouchure de l'Arsuse (Station A: 557 000 / 199 315 / 48 m; 3 échantillons), la vallée septentrionale profonde (B: 557 470 / 198 840 / 130 m; 4), le sommet de la Motte (C: 558 520 / 197 790 / 8m; 2) et la vallée méridionale (D: 559 470 / 196 790 / 100 m; 4).

2. Le 4 juillet 1984, la campagne habituelle a été étendue au prélèvement de 34 échantillons supplémentaires récoltés sur 10 stations réparties en 4 profils transversaux (No I-II-IV-V) situés du NE au SW du lac (Fig. 8).

3. L'étude se réfère également à des particules d'interface récoltées dans l'eau surnageante d'un carottier et à celles qui étaient en suspension dans la colonne d'eau qui la surmontait. La campagne s'est déroulée en mai et juin 1984 et les carottes de sédiment associées constituent la base d'étude d'une thèse (Beck, 1987). La localisation des 23 stations forment une bonne couverture du lac (Fig. 9).

B. Les mesures physico-chimiques

Durant les années 1985 et 1986, près de 200 profils verticaux de mesures physico-chimiques et turbidimétriques ont été effectués in situ. Il s'agissait d'appréhender l'évolution de la température, de l'oxygène dissous, du pH et de la conductivité conjointement aux mesures turbidimétriques, représentatives de la concentration des particules en suspension. Ces paramètres apparaissent en effet directement responsables du comportement particulaire d'un milieu lacustre ou marin. Les campagnes se sont déroulées du printemps à l'arrière-automne, avec un bateau "Shetland" acquis par le L.M.F.G. de l'Institut de Géologie.

Au cours de la première saison, la détection des variations régionales et mensuelles a été abordée par 10 campagnes d'enregistrement de mesures sur 16 stations (No 1 à 16) localisées sur l'ensemble des sires morphologiques du lac (Fig. 10). En 1986, par contre, seules certaines stations représentatives ont été conservées, associées à des observations ponctuelles: le 1er juillet, à l'embouchure de l'Arsuse, 6 stations supplémentaires (PR: 1-3-4-5-7-8) ont été ajoutées au profil des stations Areuse - Glett; le 25 juillet, un profil longitudinal de 4 stations (No 17-18-19-20) a été enregistré dans le haut-lac.

De plus, au cours de l'année 1986, un système d'échantillonnage des particules par "trappes à sédiments" a été immergé dans la plaine neuchâteloise (Chap IV.1). Le site d'implantation de ce dispositif a constitué une nouvelle station (Nnplaine: No 0), visitée lors de chaque campagne de cette année.

Toutes les stations d'enregistrement des paramètres physico-chimiques et turbidimétriques sont localisées sur la figure 10. La dénomination des stations et le calendrier des campagnes sont présentés dans le tableau 2.

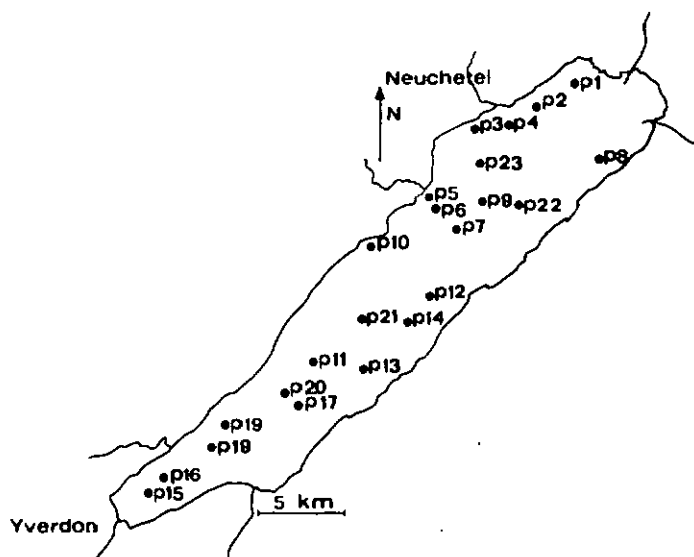


FIG. 9: Situation des points d'échantillonnage des particules en suspension dans l'eau surnageante et à l'interface sédimentaire, durant les mois de mai et juin 1984.

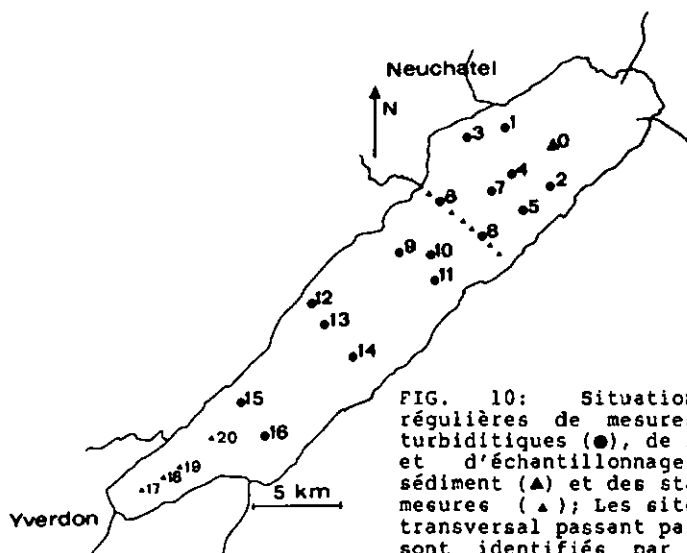


FIG. 10: Situation des 16 stations régulières de mesures physico-chimiques et turbidimétriques (●), de la station de mesures et d'échantillonnage par collecteurs à sédiment (▲) et des stations ponctuelles de mesures (▲); Les sites situés sur le profil transversal passant par les stations 6 et 8 sont identifiés par PR1 à PR8, à partir de l'embouchure de l'Areuse, le 01.07.86. Lors de cette campagne (CAMP018), les stations 6 et 8 deviennent PR2 et PR6.

TABLEAU 2a: Numéros et noms des stations

0 NNPLAINE

1 NEUCH	2 CHAMP	3 SERR	4 NPLAINE
5 PORT	6 AREUSE	7 NMOTTE	8 GLETT
9 BEVAIX	10 SMOTTE	11 FOREL	12 AUBIN
13 SPLAINE	14 ESTA	15 CONCI	16 MENTUE
17 GRANDSON	18 CORCE	19 CHAMPA	20 ONNENS

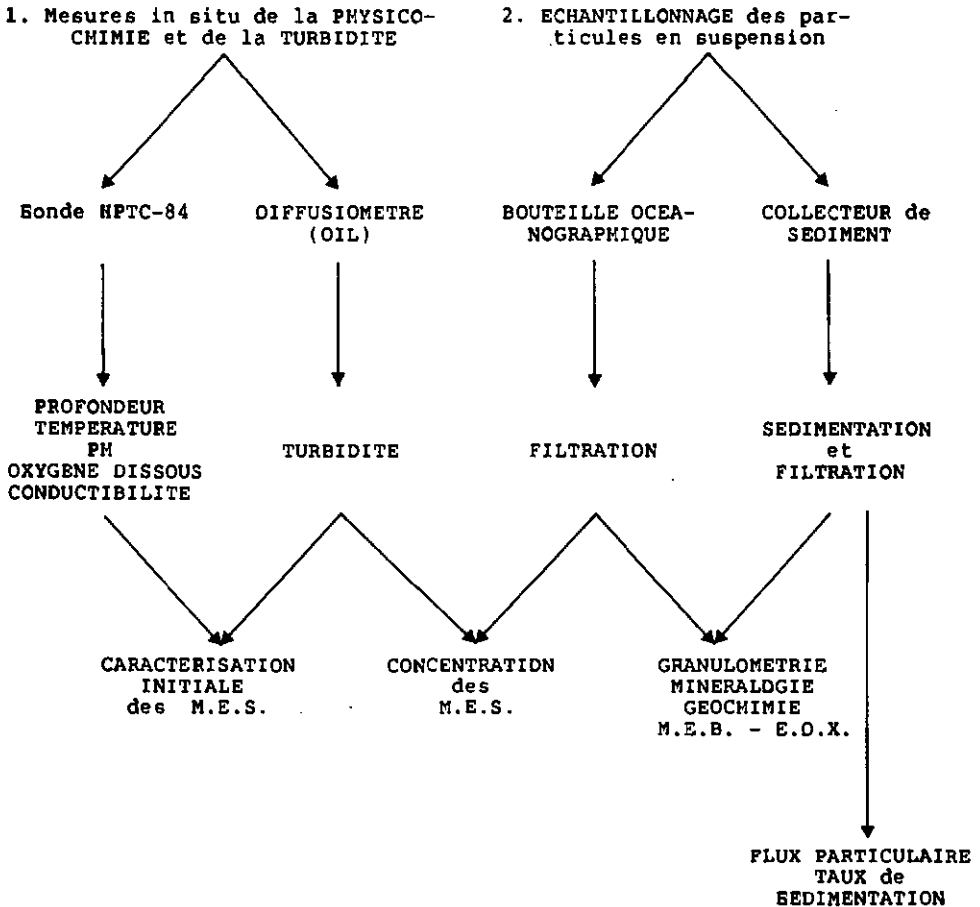
TABLEAU 2b: Calendrier des campagnes

CAMPAGNE	00:	19 - 21	MAI	1985
	01:	19 - 21	JUIN	1985
	02:	04	JUIL	1985
	03:	16	JUIL	1985
	04:	24	JUIL	1985
	05:	09	AOUT	1985
	06:	21	AOUT	1985
	07:	12	SEPT	1985
	08:	18	SEPT	1985
	09:	31	OCTO	1985
	10:	02	MAI	1986
	11:	06	MAI	1986
	12:	13	MAI	1986
	13:	20	MAI	1986
	14:	22	MAI	1986
	15:	27	MAI	1986
	16:	06	JUIN	1986
	17:	23	JUIN	1986
	18:	01	JUIL	1986
	19:	22 - 25	JUIL	1986
	20:	08	AOUT	1986
	21:	14	AOUT	1986
	22:	09	OCTO	1986
	23:	28	OCTO	1986
	24:	09	FEVR	1987

1.3 L'approche analytique

Les collectes d'échantillons des matières en suspension (M.E.S.) et les mesures hydrologiques et turbiditiques n'ont malheureusement pas pu être conduites simultanément pour des raisons pratiques. Elles sont cependant le reflet de l'évolution annuelle de cycles limnologiques tout à fait comparables entre 1984 et 1986. L'approche méthodologique qui a été adoptée au cours de cette étude est brièvement résumée sur le tableau 3. Un accent tout particulier a été porté sur les enregistrements in situ de la turbidité mise en relation avec les conditions physico-chimiques de la colonne aquatique et sur la détermination minéralogique des particules en suspension.

TABLEAU 3: Présentation générale des manipulations analytiques



II. PHYSICO-CHIMIE DE L'EAU

II.1 Présentation de l'appareil de mesures et du traitement des résultats.

Toutes les mesures physico-chimiques ont été acquises avec une sonde HYDROPOLYTESTER HPTC-84, de Züllig AG à Rheineck (SG). L'ensemble est constitué de l'assemblage des 5 sondes proprement dites (Profondeur, Température, Oxygène dissous, PH et Conductibilité), d'un câble de 150 m renfermant 18 conducteurs, d'une valise de modules électroniques avec affichage digital, d'un micro-ordinateur EPSON HX-20 et d'une alimentation de 24 Volts.

La sonde bathymétrique, munie d'une membrane piézo-résistante protégée par un cylindre en acier, mesure la profondeur avec une précision de ± 0.1 m. L'influence de la pression atmosphérique est corrigée avant chaque profil d'enregistrements. Les mesures de température assurent une fiabilité de ± 0.1 °C avec un Thermistor Pt 100. Les valeurs de concentration en oxygène dissous sont assurées à ± 0.1 mg/l par une sonde WTW à pression compensée, selon le principe de la réduction sur des électrodes ampérométriques à membrane couverte (Rodier, 1978). Avant chaque campagne, il est nécessaire de vérifier la droite d'étalonnage entre 0 (par l'emploi d'une solution "nulle" de Na₂S) et environ 12 mg/l d'une solution mesurée. L'analyse du PH est réalisée avec une électrode de verre à pression compensée. Elle atteint une précision de ± 0.01 unité en étant souvent soumise à un réglage de normalisation avec une solution tampon de PH = 7; tout aussi régulièrement, il est judicieux de procéder au réglage du correcteur de pente avec une solution tampon de PH = 9.21. La conductibilité, quant à elle, est déterminée par la mesure de la conductance régnant entre 2 électrodes fixées à l'intérieur d'une sonde de verre bien ouverte permettant une excellente circulation de l'eau. Comme il est possible de choisir entre un enregistrement avec compensation thermique à 20 °C ou l'enregistrement des valeurs brutes, des essais ont été opérés en laboratoire sur une solution variant entre 5 et 20 °C. Il est apparu que le réglage électronique permettait une très bonne détermination des valeurs compensées à 20 °C, malgré la légère déviation qui existe entre la loi mathématique et cette correction linéaire. L'écart de précision extrême s'est élevé à ± 3 μ S/cm. La vérification du réglage de base aux environs de 0 μ S/cm et du correcteur de pente vers 350 μ S/cm n'est pas indispensable lors de chaque campagne. La sonde turbidimétrique associée à cet ensemble sera décrite ultérieurement.

Durant les mesures, la sonde est descendue manuellement dans la colonne d'eau avec une vitesse approximative de 0.2 m/s, conditionnée essentiellement par la capacité d'acquisition de l'EPSON HX-20. Cette vitesse permet l'enregistrement d'environ 3 cycles de mesures par mètre. L'ensemble des résultats est stocké sur mini-cassettes, puis transféré sur l'ordinateur VAX-VMS du Centre de Calcul de l'Université de Neuchâtel.

La présentation initiale des données permet de déterminer l'évolution des différents paramètres sur des profils verticaux de chaque station lors de toutes les campagnes. Les traitements ultérieurs conduisent à illustrer le comportement physico-chimique saisonnier d'une station à toutes profondeurs par le dessin d'isoplèthes paramétriques. Celles-ci peuvent être obtenues par la méthode des variables régionalisées utilisée comme base de calcul dans un programme de krigeage tel que "BLUPACK" développé au Centre de Géostatistique de Fontainebleau. Finalement, au lieu de suivre une seule station au cours du temps, il est possible de dessiner les isoplèthes physico-chimiques de plusieurs sites d'une même campagne répartis sur un profil longitudinal ou transversal du lac. Il faut toutefois rester très prudent dans l'emploi et l'interprétation de structures fines obtenues par un tel programme, essentiellement lorsque les mesures paramétriques présentent de forts gradients. C'est pourquoi nous limiterons son utilisation à l'identification globale des couches limnologiques, à l'évolution saisonnière d'une station ou encore aux hétérogénéités physico-chimiques et turbidimétriques régionales.

II.2 Présentation et discussion des résultats

A. La Température

Le comportement général de la température du lac a été abondamment traité par Sollberger (1974) et ses prédécesseurs. Cependant, simultanément aux autres paramètres physico-chimiques, l'enregistrement thermique est absolument indispensable pour mieux comprendre les processus biologiques, chimiques et minéralogiques qui se déroulent dans la colonne d'eau.

1. Présentation des résultats:

A la fin de l'hiver, le lac possède la même température de la surface au fond; il est très rare qu'il présente une stratification thermique inverse. Au printemps, l'eau de surface se réchauffe sous l'influence du rayonnement solaire, mais la chaleur ne se propage que très lentement en profondeur. Il s'établit ainsi très vite une stratification qui préserve l'eau chaude, plus légère, au-dessus de l'importante masse d'eau froide, plus dense. Une série de profils thermiques verticaux de la couche supérieure permet d'illustrer l'identification progressive de la stratification lacustre et son amplification estivale (Fig. 11). Cette couche réchauffée correspond à l'EPIILIMNIUM. Le niveau inférieur, ou thermocline, caractérisé par une chute rapide de la température, équivaut au METALIMNIUM. Il est peu développé et proche de la surface en mai; il s'intensifie durant l'été et s'enfonce au-delà d'une trentaine de mètres en automne (Fig. 12).

Au début de son installation, la stratification thermique peut être perturbée par de violentes tempêtes capables de réinstaurer une homogénéisation dans les couches soumises à l'action des vagues (Fig. 13): le 22 mai, la

stratification est bien établie; le 6 juin, après quelques jours de vents violents, la thermocline s'est enfoncée d'environ 5 m pour atteindre une profondeur de 15 m. Conjointement, la température de la couche décimétrique de surface a baissé de près de 2 °C. Après le rétablissement d'une période calme (le 1er juillet), le réchauffement superficiel et l'enfoncement de la thermocline reprennent leur évolution estivale.

Au-dessous du métalimnium, la température ne subit qu'une très faible diminution avec la profondeur (Fig. 12); c'est l'HYPOLIMNIUM. A l'approche de l'hiver, sous l'influence des tempêtes automnales, l'eau de surface déjà refroidie s'y enfonce et engendre un brassage progressif jusqu'au retour homothermique de la masse aquatique du lac. Cette homogénéisation subsiste alors jusqu'au printemps de l'année suivante (Fig. 14).

Le dessin des isothermes saisonnières d'une station révèle les températures maximales de surface en juillet et août; il illustre également l'amplification estivale de l'épilimnium et les légères disparités thermiques des couches profondes (Fig. 15 - 16). A proximité du fond, une élévation sensible de la température n'est perceptible qu'à la fin de l'automne. Au cours d'une même campagne, les isothermes de plusieurs stations réparties sur un profil longitudinal ou transversal du lac montrent qu'à une profondeur identique, les variations régionales sont généralement ténues jusqu'à l'approche de la couche benthique. Par contre, au début de l'été, ces isothermes subissent une forte influence de la topographie lacustre à proximité du fond. Il arrive ainsi qu'elles épousent parfaitement le profil bathymétrique du lac (Fig. 17).

2. Discussion des résultats:

- Dans les couches superficielles, de légères disparités thermiques régionales peuvent parfois s'individualiser à une profondeur similaire du lac. Malgré la faiblesse du réseau d'observation (16 stations de mesures), il nous a paru intéressant de représenter la répartition spatiale des isothermes sur une grande partie de la surface lacustre. A chacune des cotes mesurées, des variations régionales appréciables sont susceptibles de déterminer différentes zones thermiques. Des corrélations géographiques nettes existent habituellement entre les cartes de répartition des divers niveaux épilimniques. Ainsi, le 24 juillet 1985, à 5 m de profondeur (Fig. 18), une zone chaude caractéristique prend forme au-dessus de la Motte. A 20 m (Fig. 19), deux masses froides s'amplifient au-dessus des grandes plaines profondes, au Nord-Est et au Sud-Ouest de la Motte. Elles s'opposent aux deux masses côtières plus chaudes, au large d'Estavayer-le-Lac et de Gorgier.

Plusieurs causes plausibles interviennent certainement alternativement ou simultanément pour expliquer les variations régionales de profondeur des isothermes. Tout d'abord, les apports des rivières, surtout au printemps quand ils sont abondants, influencent directement la thermique du lac à leur embouchure. Ainsi, le 2 mai 1986, la "plume" de l'Arsuse est magnifiquement soulignée à

plusieurs centaines de mètres de son embouchure (Station: Areuse, No 6, Fig. 10). Le profil thermique vertical y marque un gain important de 1.5 °C entre 15 et 35 m par rapport à la station "Nnplaine" de plein lac (Fig. 20). De même, le 1er juillet 1986, l'arrivée des eaux froides de l'Areuse influencent directement le comportement de la thermocline (Fig. 21) qui subit une nette remontée à l'embouchure de la rivière (PR 1); au-dessus de la vallée profonde (Station: Areuse), son élévation est moins accentuée et se répercute essentiellement jusqu'à 17 m de profondeur. La thermocline est typiquement lacustre plus au large (PR 3). Le sommet de la couche hypolimnique (30 à 50 m) est aussi légèrement affecté par ces perturbations externes.

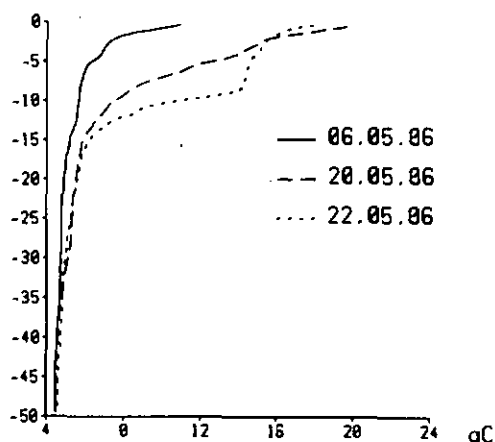
Ensuite, durant la période estivale calme, l'échauffement épilimnique peut être plus rapide à proximité des rives peu profondes qu'au large. Favorisée par une morphologie moins accentuée, la rive Sud possède des eaux plus chaudes que la côte jurassienne jusqu'aux environs de 40 m de profondeur (Fig. 22). Au-delà, elles se refroidissent nettement et atteignent plus rapidement l'isotherme de 5 °C que dans la vallée Nord. Cette distribution thermique est certainement conditionnée par la topographie caractéristique du lac, marquée par l'imposante colline immergée de la Motte. Le décalage bathymétrique des isothermes de part et d'autre de cette colline souligne alors la mauvaise homogénéisation qu'elle engendre et le rôle capital qu'elle procure à l'identification de 2 masses aquatiques différentes.

Dans le petit lac, le gain thermique peut être procuré par la faiblesse des fonds; les apports estivaux des affluents sont habituellement ténus et incapables d'apporter d'intenses perturbations dans la masse aquatique. Ainsi, dans un profil longitudinal qui s'étend de l'embouchure de la Thielle à la plaine Sud, profonde, les isothermes du 25 juillet 1986 subissent une remontée très accentuée (Fig. 23).

Finalement, la direction et l'intensité des vents peuvent également constituer un facteur important pour susciter la création de zones thermiques distinctes à proximité de la surface et produire ainsi des modifications régionales des profondeurs isothermiques (Quartier, 1948; Sollberger, 1974).

- Dans la couche benthique, des températures similaires peuvent exister sur plusieurs stations de profondeur différente (Fig. 17). Elles caractériseraient une masse d'eau qui épouserait approximativement le fond du lac lorsque la profondeur excède une trentaine de mètres. Une telle structure, vraisemblablement éphémère, n'apparaît pas lors de chaque campagne. Il est probable que sa mise en évidence temporaire peut être illustrée par les perturbations qu'elle cause sur la tendance générale que subissent les isothermes profondes vers un enfoncement en cours de saison (Fig. 15 - 16). L'origine de cette couche thermique demeure complexe. Nous associerons son interprétation à celle des augmentations particulières des couches benthiques néphéloïdes (Chap. III.4).

Metres FIG 11 A: TEMPERATURE - NNPLAINE



Metres FIG 11 B: TEMPERATURE - NNPLAINE

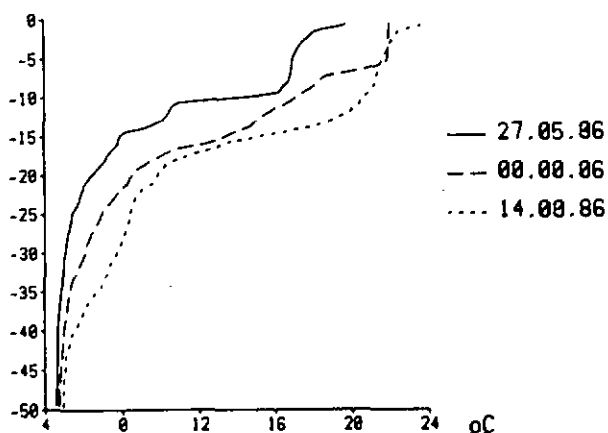


FIG. 11:A-B: Individualisation et développement de la stratification thermique estivale sur la station NNPLAINE.

Metres

FIG 12: TEMPERATURE - NNPLAINE

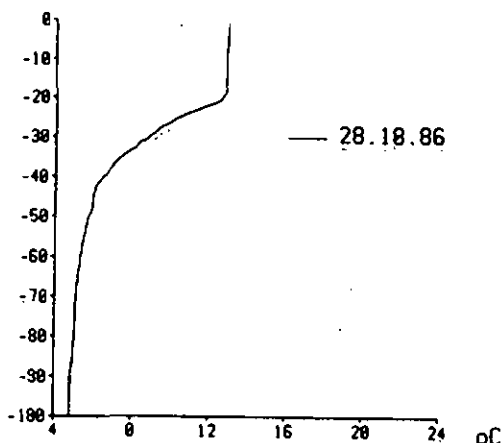


FIG. 12: Amplification automnale de l'épilmnium thermique.

Metres

FIG 13: TEMPERATURE - NNPLAINE

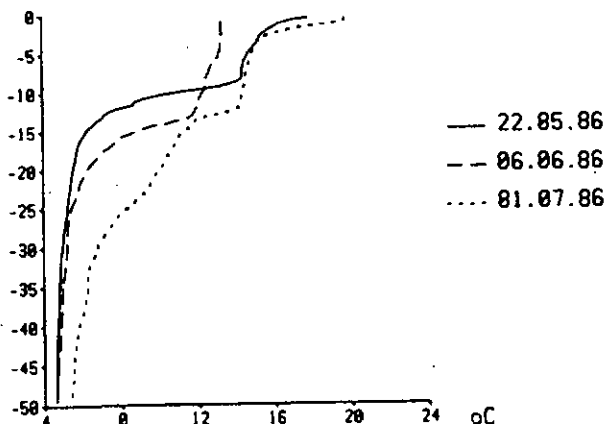


FIG. 13: Illustration d'une tempête printanière sur l'évolution de la stratification thermique.

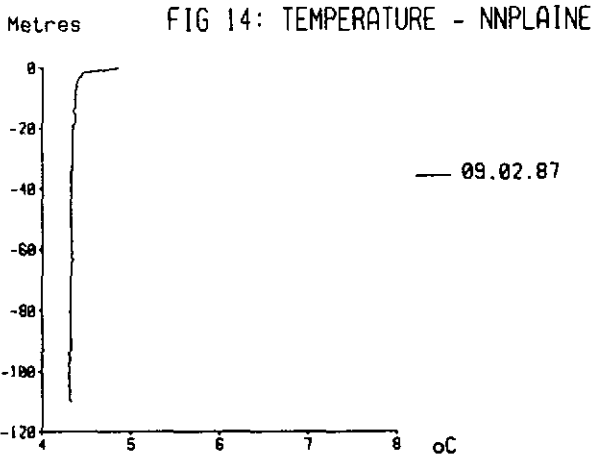


FIG. 14: Evolution thermique verticale en période hivernale; elle souligne l'excellente homogénéisation de la masse d'eau.

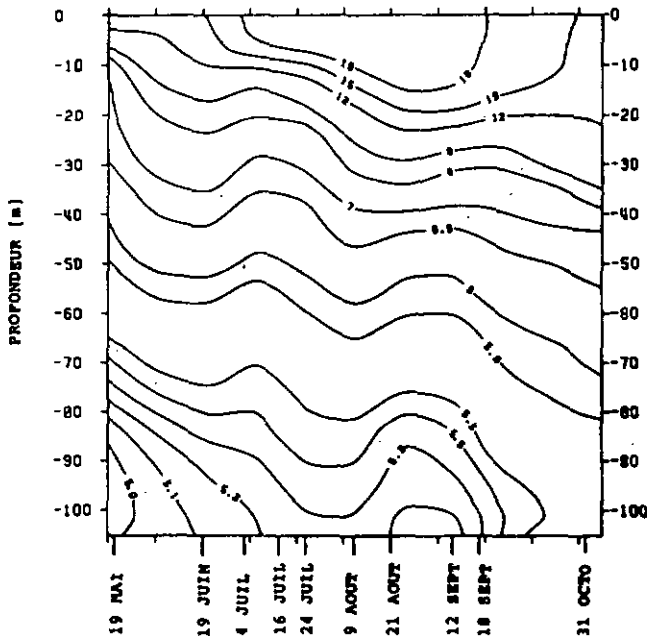
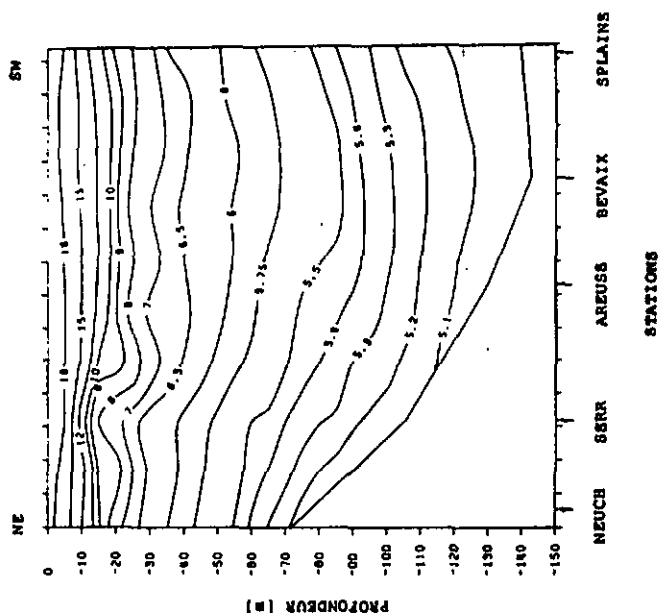


FIG. 15: Evolution verticale des isothermes au cours de l'année 1985 sur la station SERR. A 100 m de profondeur, la température atteint 5.5 °C en octobre seulement.



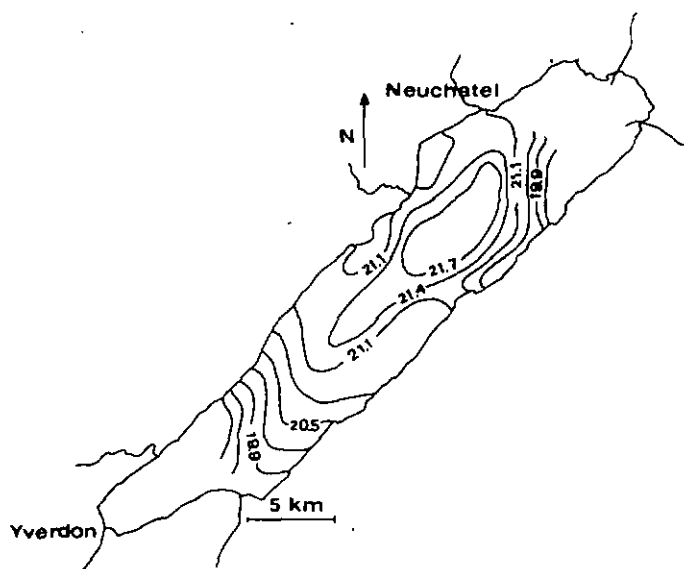


FIG. 18: Courbes isothermiques du 24.07.85 à 5 m de profondeur.

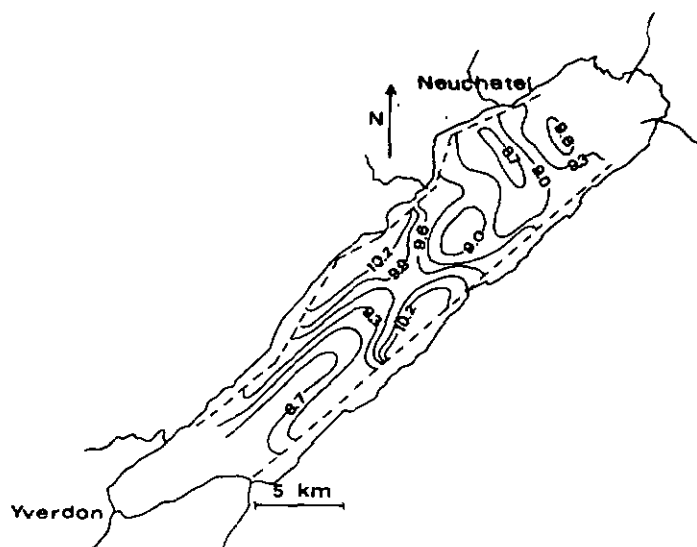


FIG. 19: Courbes isothermiques du 24.07.85 à 20 m de profondeur.

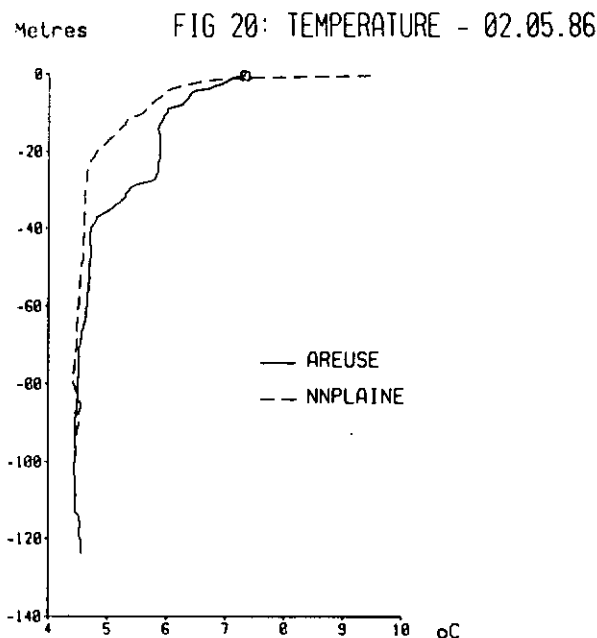


FIG. 20: Profil thermique d'une station influencée par les apports de l'Areuse (AREUSE) comparé à celui d'une station de plein lac (NNPLAINE).

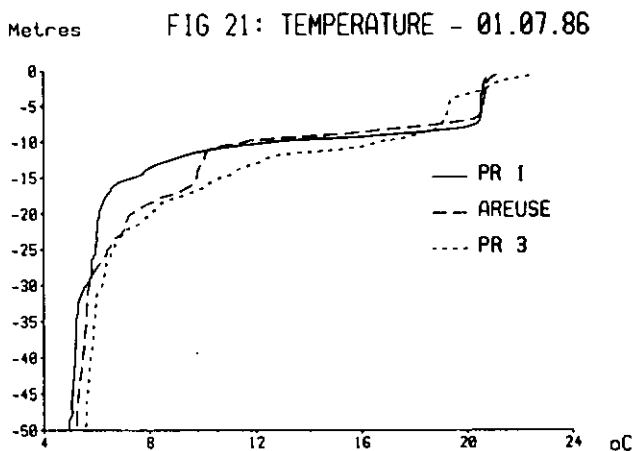


FIG. 21: Profils thermiques d'une station très proche de l'embouchure de l'Areuse (PR1), d'une station encore influencée par ses apports (AREUSE) et d'une station plus distale, de plein lac (PR3) (situation sur FIG. 10).

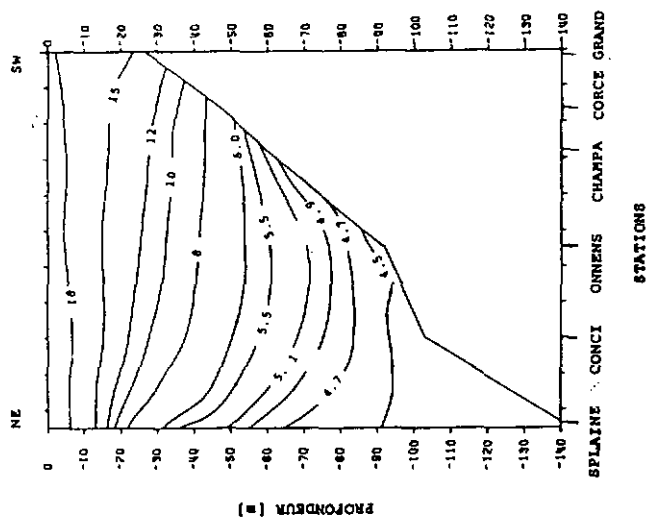


FIG. 23: Dans le haut-lac, les isothermes d'une coupe verticale parallèle au bassin ramontent entre Grandson (SW) et Splaine (NE) (Echelle horizontale: 1 cm = 1.306 km).

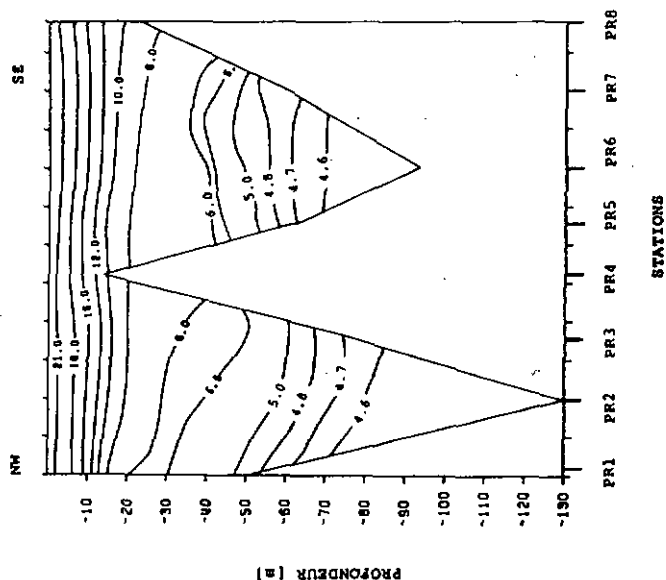


FIG. 22: Profil thermique transversal du lac, de l'embouchure de l'Areuse à la rive Sud, en passant sur la Motte (01.07.86) (Echelle horizontale: 1 cm = 0.41 km).

B. La concentration en Oxygène dissous.

1. Présentation des résultats:

Le teneur en oxygène dissous dans l'eau est étroitement liée au régime thermique du lac. Durant la pause hivernale, l'ensemble aquatique est homotherme (Fig. 14); la distribution de l'oxygène est alors homogène sur toute la colonne d'eau. Au printemps, l'éveil de la végétation provoque une intense activité chlorophyllienne dans l'épilimnium. Des sursaturations passagères en oxygène peuvent alors atteindre 130 % pour des concentrations proches de 15 mg/l (Fig. 24). Durant cette période, des influences externes (essentiellement météorologiques) peuvent perturber sa répartition verticale et la concentration épilimnique peut même s'abaisser au-delà de celle des couches profondes (Fig. 25). Toutefois, au terme de ces phénomènes passagers, la production d'oxygène se rétablit à proximité de la surface; son intensité est de plus soulignée par l'amorce d'un déficit qui s'initie dans le niveau sous-jacent (Fig. 26). Vers le milieu de l'été, le pic de haute concentration est momentanément repoussé à une dizaine de mètres de profondeur alors que la couche superficielle est appauvrie en oxygène (Fig. 27). Par la suite, un taux épilimnique proche de 10 mg O₂/l se maintient jusqu'en automne (Fig. 28 - 29: A).

La concentration de l'oxygène varie également d'une couche thermique à l'autre. Le métalimnium, c'est-à-dire la couche qui recouvre la thermocline, développe ses propres fluctuations qui suivent une évolution essentiellement saisonnière, indépendamment du comportement de surface. Un appauvrissement caractéristique s'individualise au début juillet (Fig. 26) et s'intensifie jusqu'en automne (Fig. 28).

A proximité du fond, la concentration moyenne évolue généralement entre 11 mg/l à la fin de l'hiver (Fig. 24) et quelque 8 mg/l à l'approche des brassages automnaux (Fig. 29: A). Elle diminue beaucoup moins nettement entre le métalimnium et la couche de fond décimétrique qui enregistre cette baisse assez prononcée. Elle varie ici entre 11.5 mg O₂/l au printemps (Fig. 24) et environ 10.0 mg/l à la fin de la période de stratification thermique (Fig. 29: A).

2. Discussion des résultats:

Dans l'épilimnium, après l'explosion algale initiale, les fluctuations reflètent principalement les conditions météorologiques (brusques chutes de la température atmosphérique, tempêtes, brassages dynamiques avec la couche sous-jacente, etc.) et la succession estivale des différentes phases de production planctonique (Pokorny, 1984). Ainsi, en 1985, la température élevée du mois de mai a très rapidement engendré une intense prolifération algale et, corrélairement, une forte augmentation de la concentration en oxygène dissous dans la couche superficielle (Fig. 24). La brusque diminution superficielle de juin (Fig. 25 - 30) peut s'expliquer par les effets conjugués de la détérioration météorologique et

du comportement microbiologique. En effet, au début de ce mois, il s'est produit un net refroidissement accompagné de vents violents, confirmés par les enregistrements de l'Observatoire Cantonal de Neuchâtel, essentiellement les 8, 9, 10, 12 et 14 juin 1985. Les vagues ainsi générées ont créé un mélange des eaux superficielles très oxygénées avec celles de la couche sous-jacente nettement moins riches. De plus, tout au long de la période de production planctonique, il s'est établi un relais entre les populations phytologiques, les populations zoologiques et le potentiel nutritif. Il a été suggéré ailleurs (Schelske et al., 1983; Currie and Kalff, 1984; Gächter and Mares, 1985) qu'après une consommation exagérée des phosphates biodisponibles, une association planctonique ne pouvait plus se développer; elle marquerait même une rapide régression temporaire. Cette accalmie provisoire peut toutefois provoquer un réapprovisionnement phosphorique capable d'alimenter le renouvellement algaire symbolisé, au début juillet, par la réapparition du pic positif de la concentration en oxygène dissous dans l'épilimnium (Fig. 26).

Parallèlement à ce problème phytosociologique, le lac de Neuchâtel subit également, vers le milieu de l'été, une forte poussée de zooplancton qui consomme la population algaire du printemps et corrobore ainsi à la disparition de la couche épilimnique sursaturée en oxygène (Pokorny, 1983). A l'épuisement de ce stock alimentaire, la population zooplanctonique s'estompe et cède à nouveau la place dominatrice au règne végétal. Cette alternance, conditionnée par un déséquilibre entre les sources d'approvisionnement nutritif et les populations planctoniques, peut se prolonger tout au long de l'été. Ainsi, tant en 1985 qu'en 1986, une fine tranche aquatique de surface appauvrie en O_2 dissous se développe durant la deuxième quinzaine de juillet (Fig. 27). A 5 m de profondeur, les isoplèthes de concentration, comprises entre 7.0 et 10.5 mg O_2/l , définissent même une zone très atteinte par ce phénomène (Fig. 31). Durant les mois suivants, la concentration épilimnique reste constamment supérieure à celle de la thermocline.

Dans le métalimnium, une chute marquée de l'oxygène dissous s'initie à la suite de la première production planctonique printanière (Fig. 26). Sur les profils verticaux, un pic négatif s'individualise progressivement au cours de l'été pour atteindre un déficit proche de 2.5 mg/l par rapport à la couche sous-jacente à l'approche des brassages d'automne (Fig. 28). Dans le même intervalle, le PH subit une atténuation très significative et la conductibilité augmente fortement (Fig. 29: A-B-C). La simultanéité de tous ces phénomènes au niveau de la thermocline serait imputable au début de la minéralisation de la biomasse. En effet, la rapide diminution thermique développée dans le métalimnium engendre une nette élévation du gradient de viscosité de l'eau qui va causer un ralentissement appréciable de la vitesse de sédimentation des particules. Comme la majorité de celles-ci sont organiques, elles subissent durant cette période un début de dégradation responsable de la consommation de l'Oxygène dissous et de l'abaissement du PH.

Dans l'hypolimnium, les variations verticales sont ténues au cours d'une campagne; seule la couche benthique subit une désoxygénation estivale dont le seuil ne s'abaisse toutefois jamais au-delà de quelque 7.5 mg/l en fin de saison (Fig. 28 - 29: A). Par contre, quelques observations conjointes réalisées sur le lac de Morat en juillet 1986 y révélaient une situation beaucoup plus précaire; la concentration de l'hypolimnium est voisine de 1 mg O₂/l (Fig. 32).

Lors d'une campagne, l'évolution verticale de l'oxygène dissous se manifeste de manière comparable sur toutes les stations d'un profil longitudinal (Fig. 33). Dans l'épilimnium, lors d'une grande production photosynthétique d'oxygène, sa mise en évidence est généralisée sur toute la surface appréhendée. Au niveau de la thermocline, l'appauvrissement caractéristique des réactions bio-géochimiques s'étale également sur toute la masse d'eau hypolimnique bien oxygénée. A proximité du fond, cependant, la consommation d'oxygène commence toujours à une altitude comparable à partir de l'interface sédimentaire, quelle que soit la profondeur de la station. Les isoplèthes de concentration suivent ainsi le profil bathymétrique du lac (Fig. 33) et définissent une couche benthique moins oxygénée confondue avec la couche thermique (Fig. 17) qui recouvre le fond lacustre.

Il faut toutefois noter que si la tendance générale de l'évolution verticale est similaire sur toutes les stations, la concentration absolue de l'oxygène peut notablement varier d'une région à l'autre (Fig. 31). En septembre 1985, par exemple, des disparités appréciables ont été enregistrées à proximité de la surface. A 5 m de profondeur (Fig. 34), une meilleure oxygénation se développe au-dessus de la Motte et sur le plateau côtier de la rive Sud. A 20 m (Fig. 35), les eaux de ce même plateau demeurent plus riches en O₂ dissous que celles qui s'étendent devant la ville de Neuchâtel.

Metres FIG 24: O2 DISSOUS - NPLAINE

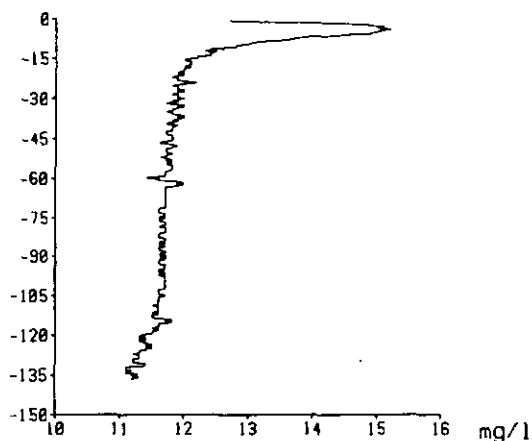


FIG. 24: Profil vertical de la concentration en oxygène dissous lors du développement phytoplanctonique maximal, le 19 mai 1985.

Metres FIG 25: O2 DISSOUS - BEVAIX

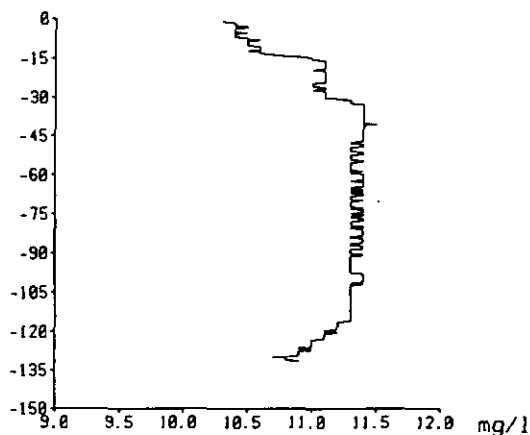


FIG. 25: Profil vertical de la concentration en oxygène dissous après des perturbations superficielles, le 19 juin 1985.

Metres FIG 26: O2 DISSOUS - BEVAIX

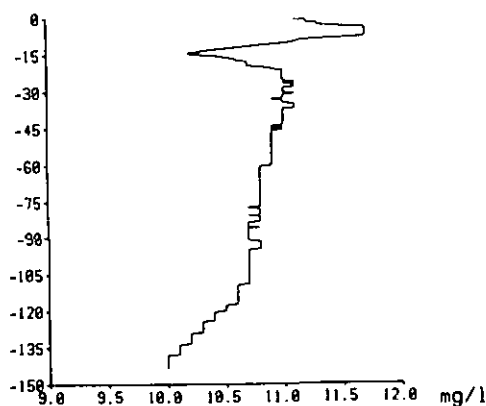


FIG. 26: Profil vertical de la concentration en oxygène dissous après le rétablissement d'une forte production planctonique superficielle et l'initialisation d'un niveau métalimnique appauvri, le 4 juillet 1985.

Metres FIG 27: O2 DISSOUS

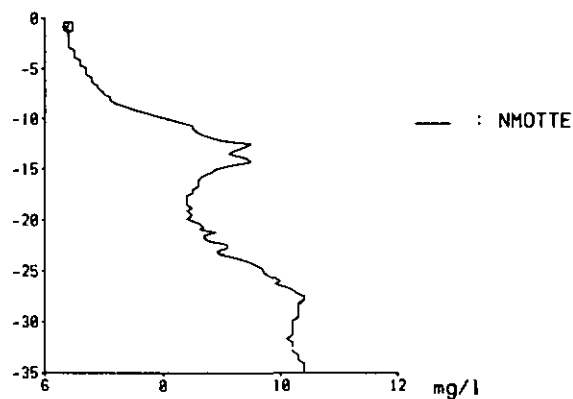


FIG. 27: Profil vertical de la concentration en oxygène dissous dans l'épilimnium, le 24 juillet 1985: le pic positif est repoussé au-delà de 10 m par une forte consommation de surface.

FIG 28: O2 DISSOUS - NNPLAINE

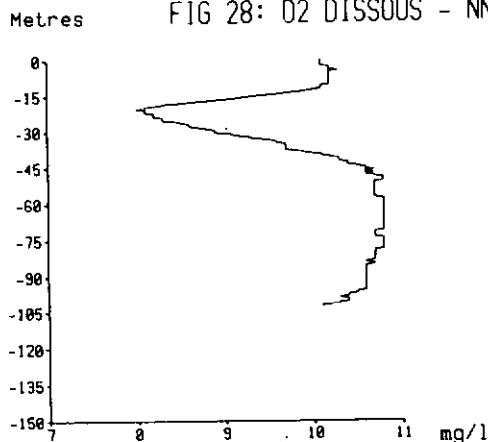


FIG. 28: Profil vertical de la concentration en oxygène dissous à la veille des brassages d'automne. L'intensité de l'appauvrissement métalimnique y est maximale (9 octobre 1986).

FIG 29: AREUSE - 09.10.86

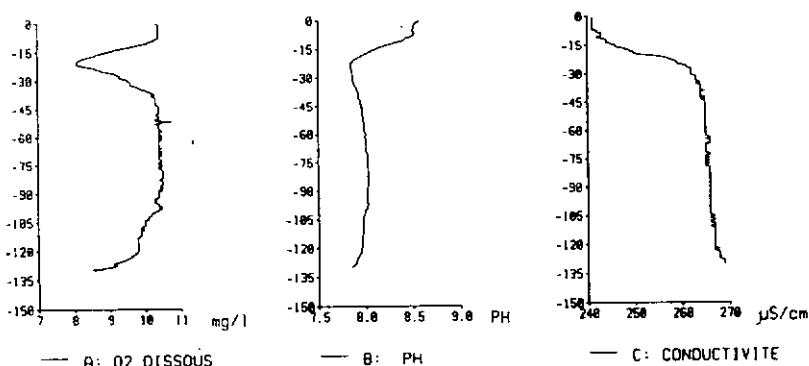


FIG.29: Corrélation des divers paramètres physico-chimiques sur le profil vertical d'une station.

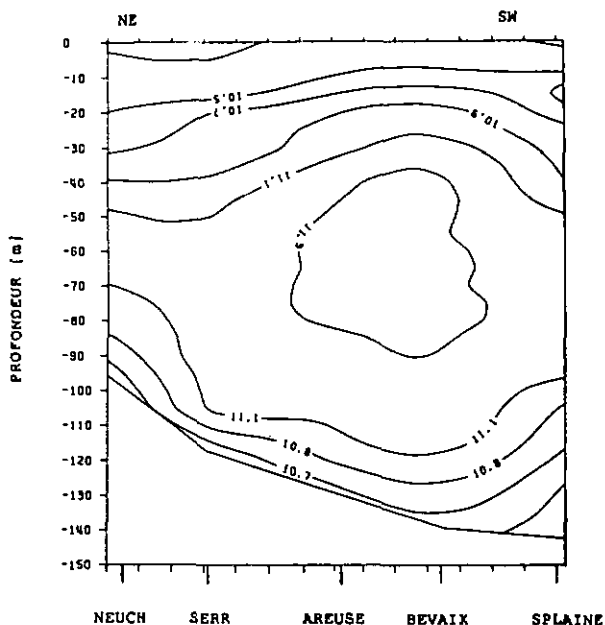


FIG. 30: Isoplèthes de la concentration en O₂ dissous dans un profil vertical du lac, le long de la rive NW, le 21.06.85. La concentration hypolimnique est supérieure à celle de surface (Echelle horizontale: 1 cm = 1.23 km).

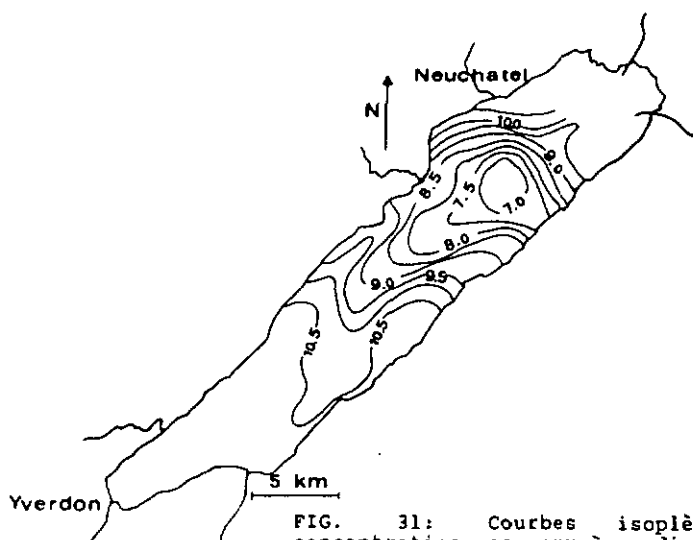


FIG. 31: Courbes isoplèthes de la concentration en oxygène dissous à 5 m de profondeur, le 24 juillet 1985. Une zone fortement affectée par la consommation planctonique se développe au-dessus de l'extrémité NE de la Motte.

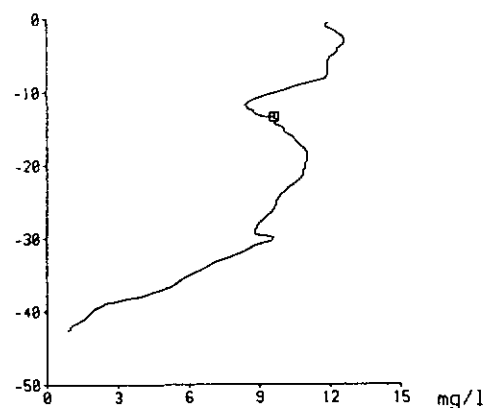
FIG 32: O₂ DISSOUS - MORAT

FIG. 32: Profil vertical de la concentration en oxygène dissous dans un lac fortement marqué par la pollution anthropique, le 22 juillet 1986.

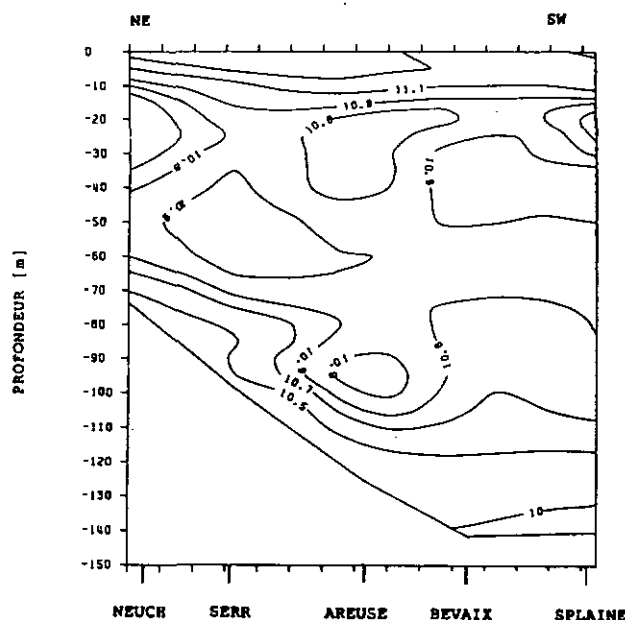


FIG. 33: Evolution de la concentration en oxygène dissous dans une coupe verticale de la vallée NW du lac, le 4 juillet 1985 (Echelle horizontale: 1 cm = 1.23 km).

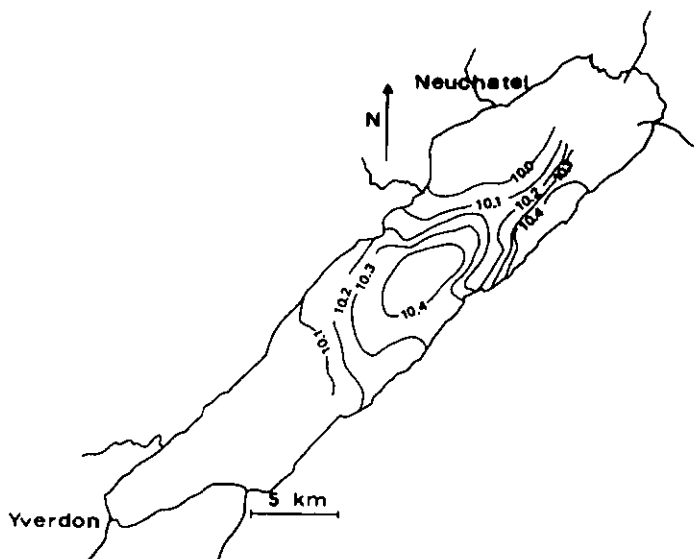


FIG. 34: Courbes isoplèthes de la concentration en oxygène dissous à 5 m de profondeur, le 18 septembre 1985.

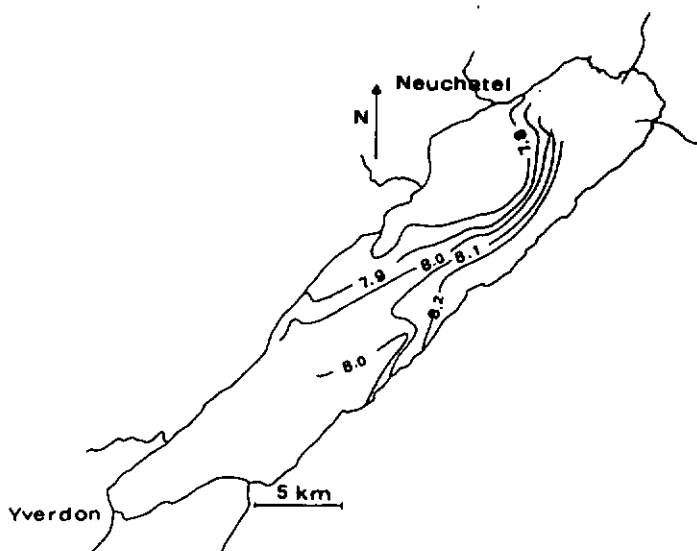


FIG. 35: Courbes isoplèthes de la concentration en oxygène dissous à 20 m de profondeur, le 18 septembre 1985.

C. Le PH

L'évolution annuelle du PH est comparable au comportement général de la concentration en oxygène dissous. Ensembles, ils sont souvent le reflet de processus et de réactions concertées. L'oxygène est essentiellement conditionné par la respiration et la photosynthèse des populations planctoniques et par la minéralisation de la biomasse. Or ces activités influencent directement la taux de concentration du CO₂ dans l'eau qui détermine finalement son PH. La photosynthèse algale consomme beaucoup de CO₂ et provoque ainsi une augmentation notable du PH des eaux de surface. La respiration, au contraire, contribue à son abaissement par production de gaz carbonique. De même, lors de la dégradation et de la minéralisation de la matière organique, le PH métalimnique, tributaire de la production de CO₂, marque une diminution conjointe à celle de la concentration en oxygène.

Le PH d'une eau douce naturelle dépend également de la variation du CO₂ causée par les réactions de précipitation et de solubilisation des carbonates et des bicarbonates. Les effets les plus sensibles se manifestent en été, lorsque l'élévation de la température provoque une précipitation carbonatée accélérée qui induit une alcalinisation de la masse aquatique. L'évolution annuelle de ces processus peut être observée sur les profils verticaux enregistrés dans le lac de Nauchâtel.

1. Présentation des résultats:

Au printemps, l'éveil de la végétation algale de la couche photique provoque une élévation du PH diurne jusqu'aux environs de 8.5 par une intense consommation de CO₂ (Fig. 36: A). Cette tranche plus alcaline s'épaissit rapidement et s'enfonce dans les eaux sous-jacentes où le PH diminue progressivement avec la profondeur, sans marquer de rupture métalimnique nette (Fig. 36: B). Vers la fin mai, par contre, la régression alcaline du PH s'accroît intensément à la base de l'épilimnium; elle crée ainsi une scission nette entre les couches superficielles et l'hypolimnium. En-dessous de cette brusque rupture du profil vertical, le PH demeure presque constant dans toute la colonne d'eau profonde (Fig. 37).

A partir de la mi-juillet, les profils verticaux des deux années d'observation présentent une évolution similaire jusqu'en automne. Au-dessous du PH élevé de la tranche superficielle, un pic négatif s'individualise et s'intensifie progressivement dans la couche thermoclinique (Fig. 38). Son développement est optimal vers la fin de la période estivale de stratification thermique (Fig. 39). Dans l'hypolimnium, les variations du PH sont très ténues dès que les effets du saut thermique se sont estompés; à proximité du fond, le PH subit toutefois une légère diminution parallèlement à l'affaiblissement de la concentration en oxygène dissous (Fig. 37 - 38 - 39).

2. Discussion des résultats:

Le 19 juin 1985, les incidences des vents d'Ouest qui avaient fortement atténué la production d'oxygène ne paraissent affecter que succinctement le PH épilimnique qui demeure élevé (Fig. 40: A). Seule l'ébauche d'une couche moins basique au niveau de la thermocline pourrait attester de leur répercussion. L'individualisation de cette couche plus ou moins épaisse pourrait être due à la dégradation des particules organiques produites par la mort du phytoplancton (Fig. 40: A) ou au développement d'une population zooplanctonique.

Le 21 juin, soit seulement 2 jours plus tard, le PH de surface a subi une nette diminution (Fig. 40: B). De même, entre 20 et 40 m, son abaissement est bien plus intense que le 19 juin. Il semble ainsi que la réaction acido-basique réagisse spontanément mais avec une certaine inertie sur les processus de photosynthèse et de respiration planctoniques. Au début juillet des années 1985 et 1986, le retard de la réaction du PH métalimnique est similaire; alors que l'oxygène dissous développe déjà une magnifique couche appauvrie (Fig. 26), il ne marque pas encore de net affaiblissement au niveau du saut thermique (Fig. 41).

Le 1er juillet 1986, il est intéressant d'observer les disparités du PH qui règnent sur les stations d'un profil transversal Areuse - Portalba (Fig. 42). Les 2 stations situées sur les versants NW (PR 3) et SE (PR 5) de la Motte montrent un PH affaibli, proche de 7.8. Dans les 2 vallées profondes et à proximité des côtes, au contraire, le PH demeure supérieur à 8.0 (PR 2 - PR 6). Cette observation tendrait à démontrer que l'oxydation des matières organiques créant un fléchissement du PH sur les flancs de la Motte s'atténuerait progressivement au-dessus d'elle et des zones profondes où la précipitation carbonatée aurait déjà été amorcée. En effet, les processus de dégradation et de minéralisation des particules organiques conduisent à une désalcalinisation de la masse d'eau et, corrélairement, amoindrissent la réaction de précipitation des microcalcites, selon la formule:



L'ensemble des observations récoltées peut être résumé par la représentation des isoplèthes annuelles du PH d'une station (Fig. 43 - 44). Dans l'épilimnium, elles sont presque horizontales; les légères ondulations qu'elles présentent, au cours des 2 années d'observation, sont caractéristiques des relais entre les populations phytoplanctoniques qui élèvent le PH et les populations zooplanctoniques qui peuvent l'abaisser. La limite métalimnique est très nette; elle est soulignée par le passage à des courbes isoplèthes verticales, représentatives de l'ensemble de l'hypolimnium. Au-dessous de la thermocline, la profondeur n'affecte donc pratiquement pas le PH journalier. Par contre, l'alcalinité aquatique profonde varie succinctement d'une campagne à l'autre, tant

en 1985 (Fig. 43) qu'en 1986 (Fig. 44).

Dans un profil vertical réunissant les stations de la vallée septentrionale profonde du lac, les courbes d'iso-PH subissent une scission identique entre l'épilimnium et l'hypolimnium (Fig. 45). En profondeur, les disparités alcalimétriques demeurent très ténues. Elles pourraient être affectées par les apports fluviaux, plus acides, car les atténuations se manifestent régulièrement au large de l'Aareuse (Bapst et Kübler, 1987). Le 21 juin 1985, les vents violents d'Ouest peuvent être à l'origine du déplacement occidental de la masse aquatique moins basique (Fig. 45).

Au cours d'une campagne, telle celle du 18 septembre 1985, les différences régionales peuvent être appréciables (Fig. 46). Le PH le plus élevé se trouve alors sur les zones peu profondes de la rive Sud et de la Motte qui constituent des régions très propices à subir une précipitation carbonatée accentuée.

Au large de l'embouchure de la Serrière, le PH marque une évolution verticale particulière. Dès le début de l'observation, en mai 1985, il présente une atténuation significative entre le métalimnium et 40 - 50 m de profondeur (Fig. 47: A). Les autres stations de cette époque sont toutes exemptes de cette caractéristique (Fig. 36: B). Au mois de juin, cette particularité aubeiste alors qu'en cours d'été elle s'atténue ou va se fondre dans le comportement général de l'alcalinité du lac (Fig. 47: B - 38). L'observation de ces résultats semblerait indiquer qu'une intensification spatio-temporelle des mesures printanières du PH permettrait de déterminer la profondeur et l'orientation des eaux de la Serrière dans celles du lac de Neuchâtel.

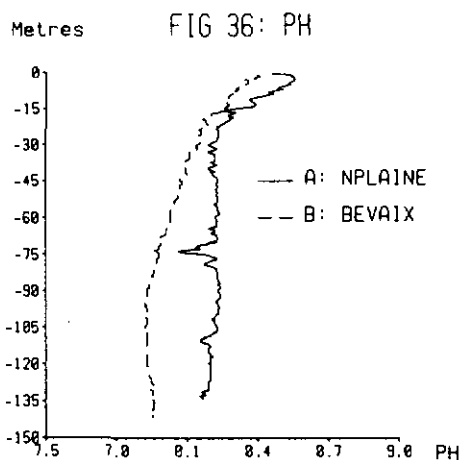


FIG. 36: Evolution verticale du PH en période printanière, le 2 mai 1986 (A) et le 19 mai 1985 (B).

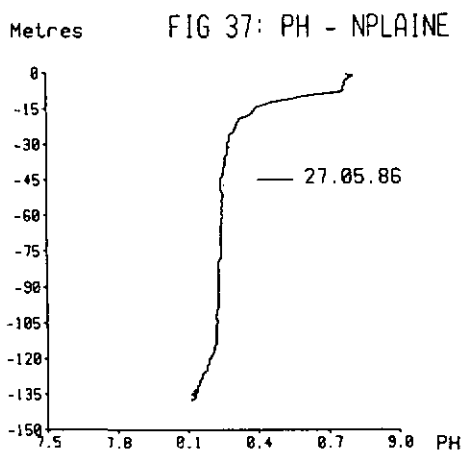


FIG. 37: Intensification du PH épilimnique et identification d'une rupture nette au niveau du métalimnium.

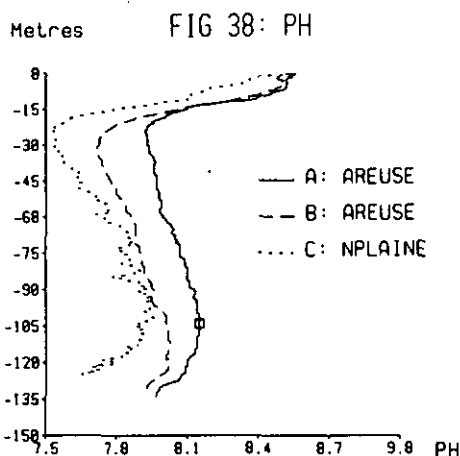


FIG. 38: Développement estival de la désalcalinisation métalimnique, le 16 juillet (A), le 9 août (B) et le 18 septembre 1985 (C).

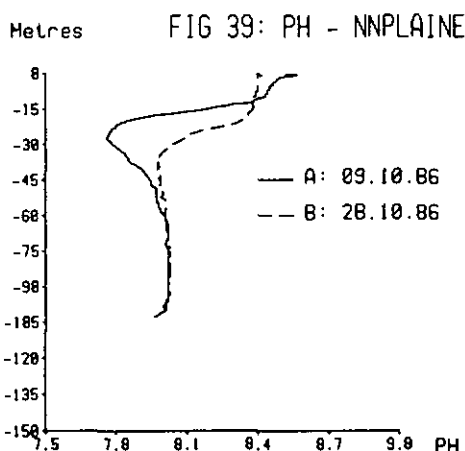
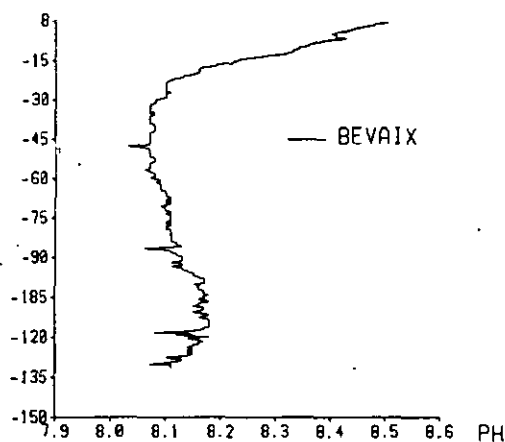


FIG. 39: Intensité maximale de la désalcalinisation métalimnique en fin de période de stratification thermique (A) et atténuation par les prémices des brassages automnaux (B).

Metres FIG 40 A: PH - 19 JUIN 1985



Metres FIG 40 B: PH - 21 JUIN 1985

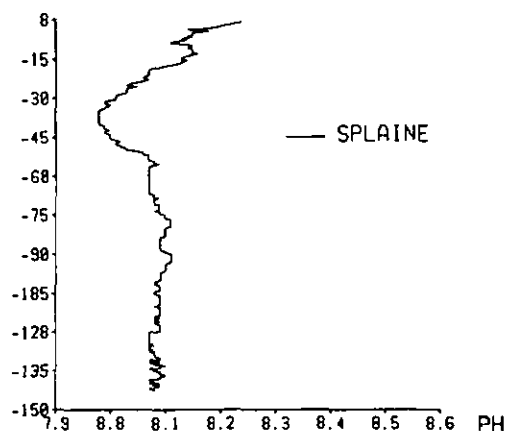


FIG. 40:A-B: Evolution verticale du PH durant une détérioration météorologique (A) et 2 jours plus tard (B).

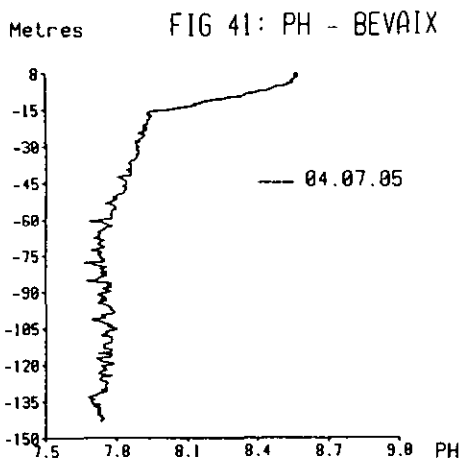


FIG. 41: Evolution verticale du PH à l'aube de la période estivale.

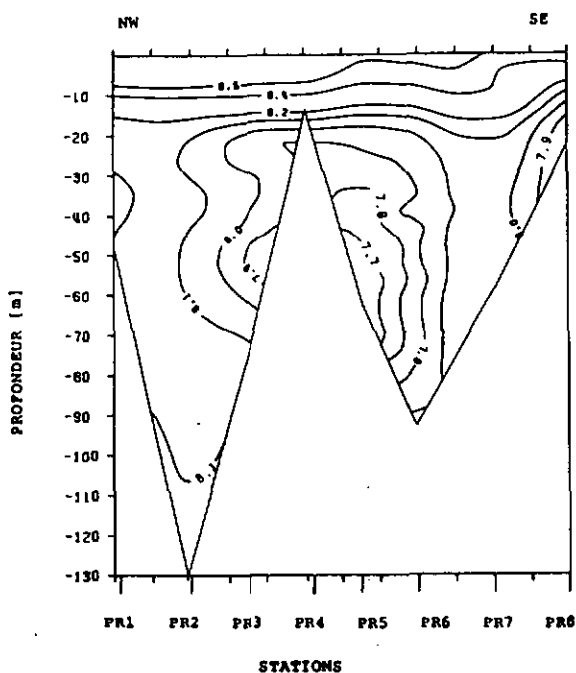


FIG. 42: Profil PH sur une coupe verticale perpendiculaire au lac, entre l'embouchure de l'Aréuse et la rive Sud, le 1er juillet 1986 (Echelle horizontale: 1 cm = 0.41 km).

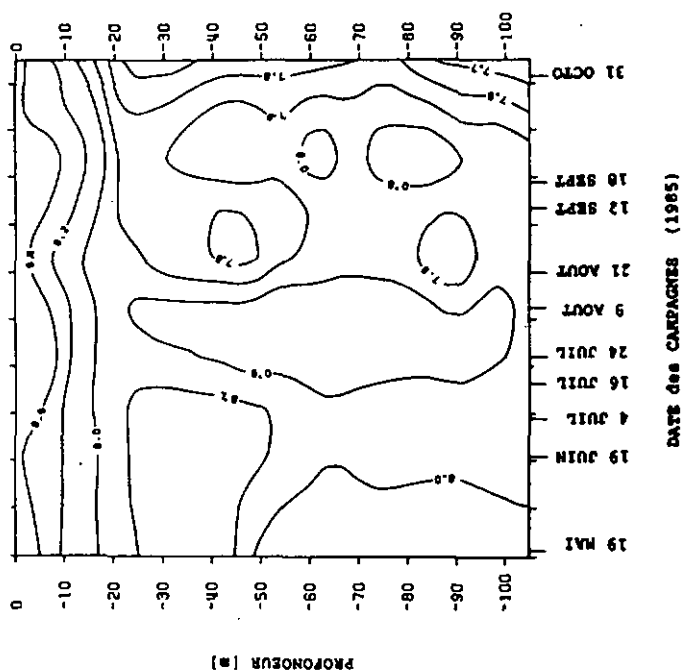


FIG. 43: Evolution verticale du pH au cours de l'année 1985 sur la station SERR.

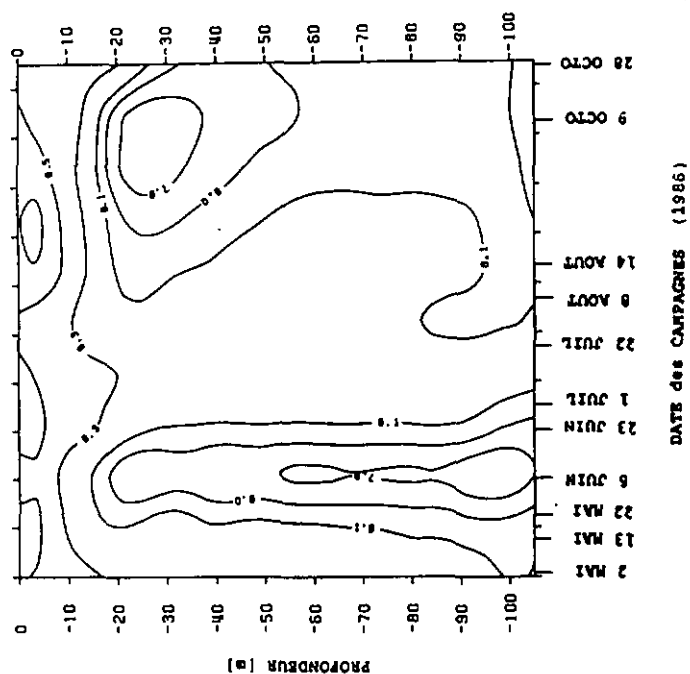


FIG. 44: Evolution verticale du pH au cours de l'année 1986 sur la station NNPLAINE.

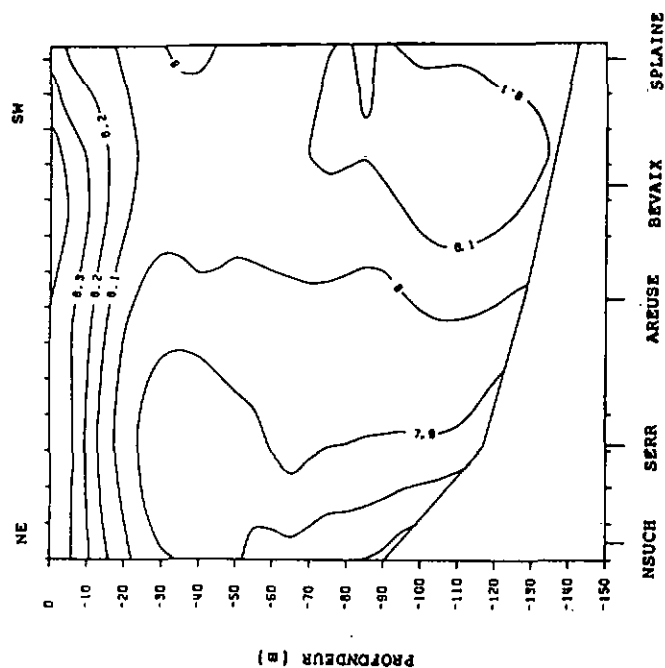


FIG. 45: Coupe verticale du PH dans un profil parallèle à l'orientation du lac, sur sa rive NW, le 21 juin 1985 (Echelle horizontale: 1 cm = 1.23 km).

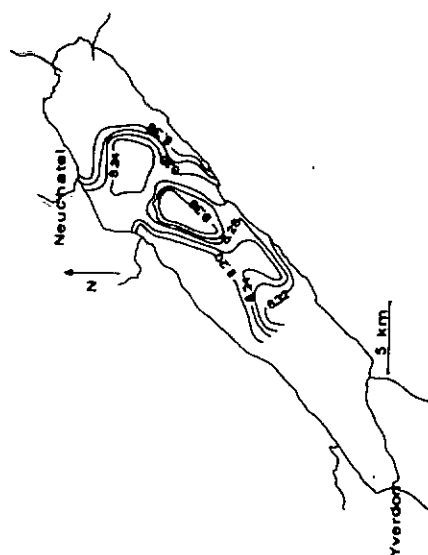


FIG. 46: Courbes isoplèthes de pH à 10 m de profondeur, le 18 septembre 1985.

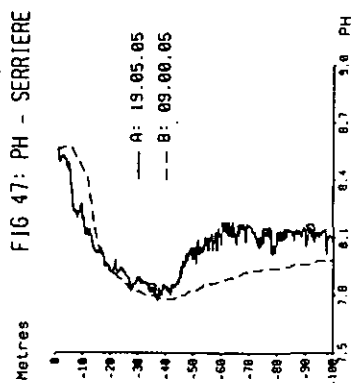


FIG. 47: Evolution verticale particulière du PH à l'embouchure de la Serrière (A) alors que sa configuration estivale est comparable à celle des autres stations (B).

D. La Conductibilité

Les mesures de la conductibilité d'une eau lacustre sont intéressantes car elles sont en étroite relation avec leur teneur totale en sels dissous. Elles sont exprimées en microsiemens par centimètre ($\mu S/cm$); et, comme elles varient avec la température, il est nécessaire de les ramener à une température donnée pour pouvoir les comparer entre elles. Actuellement, il est communément admis d'adopter la valeur thermique de 20 °C. La correction obéit à la relation:

$$K_{20} = K_t \cdot [1 - 0.023 \cdot (20 - t)]$$

avec K_{20} = Conductibilité corrigée à 20 °C

K_t = Conductivité à la température de la mesure

t = Température de la mesure

1. Présentation des résultats:

Dans le lac de Neuchâtel, la conductibilité varie suivant la profondeur, la saison et la région. Après l'homothermie hivernale, le début du cycle limnologique est marqué par une augmentation épilimnique de la température, puis de l'oxygène dissous et du PH. La conductibilité va subir un affaiblissement dans cette même couche, mais sa manifestation ne se fera sentir qu'avec une certaine inertie. Très peu sensible en mai (Fig. 48), l'atténuation de surface va s'intensifier et s'épaissir durant les mois suivants (Fig. 49: A - B - C). Dans l'hypolimnium, les variations verticales de la conductibilité aquatique sont très peu sensibles tout au long de l'année (Fig. 48 - 49). A proximité du fond, de légères augmentations peuvent toutefois se faire sentir sporadiquement à certains endroits, essentiellement sur les sites profonds et vers la fin de l'été (Fig. 50).

L'intérêt des mesures de la conductibilité se manifeste surtout dans leur évolution saisonnière et régionale. Ainsi, la masse d'eau hypolimnique estivale est légèrement moins conductrice qu'au printemps (Fig. 49 - 51: A - B). Cette chute se poursuit ensuite jusqu'à l'aube de l'hiver (Fig. 51: C), après un net sursaut durant le mois de septembre (Fig. 50). Au-dessus de la thermocline, l'évolution saisonnière est comparable jusqu'en automne; à l'approche de l'hiver, elle manifeste cependant un regain de conductibilité qui n'est pas encore sensible dans les couches profondes (Fig. 51: C).

2. Discussion des résultats:

La diminution de la conductibilité estivale du lac est très caractéristique. En 1986, malgré l'interruption des mesures durant le mois de septembre, le dessin des isoplièthes de la station "NNPLAINE" en atteste rigoureusement (Fig. 52).

L'ensemble des fluctuations peut être mis en relation avec le comportement des populations planctoniques et les réactions chimiques des carbonates qui constituent les deux principaux processus internes susceptibles de modifier la capacité conductrice de l'eau d'un lac (Kelts and Hsü, 1978).

Dès l'instauration de la stratification thermique, les algues se développent aisément en consommant du CO_2 . Cette activité photosynthétique conduit à une désionisation de l'eau et à une élévation du PH. La conjugaison de ces effets va accélérer la précipitation des carbonates dont la cristallisation pouvait être latente durant les mois printaniers (Kelts and Hsü, 1978; Portner, 1951). La diminution estivale de la conductibilité lacustre résulte donc de la connivence du développement planctonique et des réactions physico-chimiques. Un phénomène majeur et inexpliqué vient toutefois troubler l'hégémonie de cette lente évolution mensuelle. Les mesures hypolimniques de septembre ont marqué un retour passager vers une meilleure conductibilité que durant le mois précédent; en surface, les mesures demeurent assez basses (Fig. 49: C - 50). L'interprétation de cette particularité mensuelle reste obscure. Elle pourrait éventuellement s'associer aux successions estivales des familles planctoniques; l'hégémonie temporaire d'un ensemble zoologique serait alors tout à fait capable d'augurer un apport ionique de gaz carbonique suffisant pour produire cette augmentation de conductibilité.

En 1960 et 1961, le mois de septembre présentait déjà une conductibilité annuelle maximale, bien que ses valeurs étaient sensiblement plus basses qu'en 1985 (Solberger, 1974). L'augmentation durant ces 25 dernières années est importante; elle atteint plus de $25 \mu\text{S}/\text{cm}$. Si elle n'est pas imputable aux méthodes de mesures, ce qui nous paraît fort probable, elle pourrait être corrélée avec l'augmentation des eaux polluées plus chargées en matières dissoutes qui arrivent actuellement au lac. Solberger (1974) interprétait en tous cas ainsi la meilleure conductibilité locale qui régnait dans le haut-lac dont le volume plus restreint pouvait être plus affecté par les apports hydrologiques pollués.

Lors d'une même campagne, des variations de conductibilité électrique ont été constatées d'un endroit à l'autre du lac. Les différences les plus sensibles ont été observées entre la rive jurassienne carbonatée et la rive Sud molassique du lac, tant en juillet (Bapt et Kübler, 1987) qu'en août 1985 (Fig. 53). Mais en juin, des disparités conductrices de l'eau apparaissent déjà par une atténuation significative au-dessus de la Motte (Fig. 54). En septembre, malgré l'intensification globale de la conductibilité, un léger excès ionique se maintient sur la rive NW par rapport à la rive SE du lac (Fig. 55).

Le 1er juillet 1986, la conductibilité diminue légèrement de l'embouchure de l'Areuse vers le large, en direction de la Motte (Fig. 56). Il faut toutefois noter qu'il est hasardeux d'attribuer cette différence aux seuls apports de

la rivière, à peine plus conductrice que l'eau du lac, bien qu'il serait tentant de s'y référer pour étudier le comportement et les interactions d'un affluent sur une masse aquatique. Il se pourrait en effet que le rapprochement de la Motte conditionne d'avantage l'atténuation de la conductibilité que les eaux de l'Areuse ne marquent son augmentation à proximité de l'embouchure. Cette interprétation serait en accord avec l'augmentation du PH (Fig. 42), représentative d'une intense activité phytoplantonique.

Dans le haut-lac, la définition du métalimnium s'amenuise du NE (plaine profonde du Sud de la Motte) vers le SW (Fig. 57). Elle s'estompe même sur les stations peu profondes du large de Grandson.

Des relations ont été élaborées entre la conductibilité électrique et la salinité. Sollberger (1974) a pu calculer le résidu sec moyen des années 1957 à 1960 sur les 40 m de surface. Il a obtenu 183.7 mg/l. Cette moyenne e dû augmenter depuis lors parallèlement à la conductivité. Nous ne nous attarderons cependant pas sur ce calcul fastidieux qui nous amènerait à intégrer la charge ionique verticale sur différentes masses d'eau alors que nous nous intéressons essentiellement à la phase particulaire.

Metres

FIG 48: CONDUCTIBILITE - NPLAINE

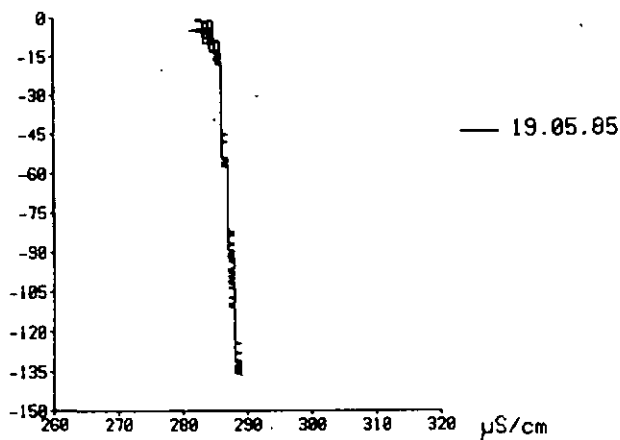


FIG. 48: Evolution verticale printanière de la conductibilité.

Metres

FIG 49: CONDUCTIBILITE - SERRIERE

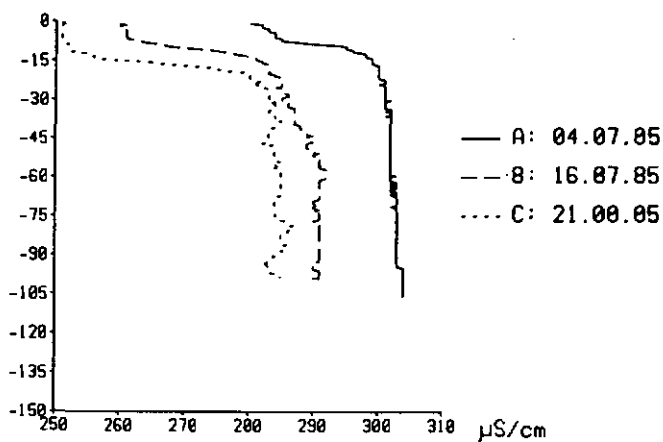


FIG. 49: Identification estivale de l'épilimnium par une diminution progressive de la conductibilité et atténuation synchrone dans l'hypolimnium.

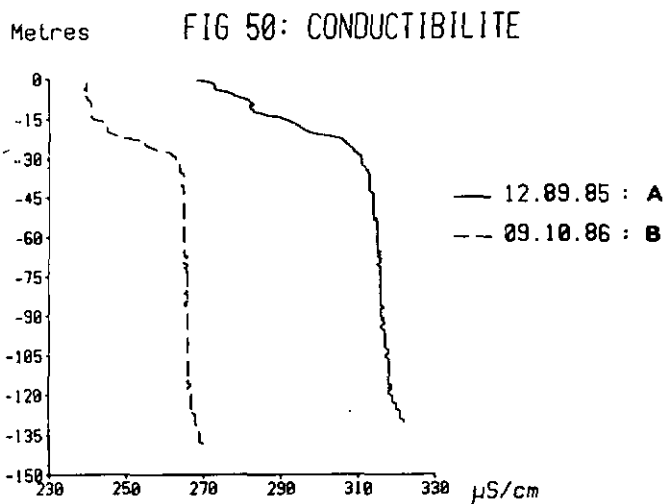


FIG. 50: Evolution verticale de la conductibilité avec légère intensification à proximité du fond sur les stations NPLAINE (A) et SPLAINE (B).

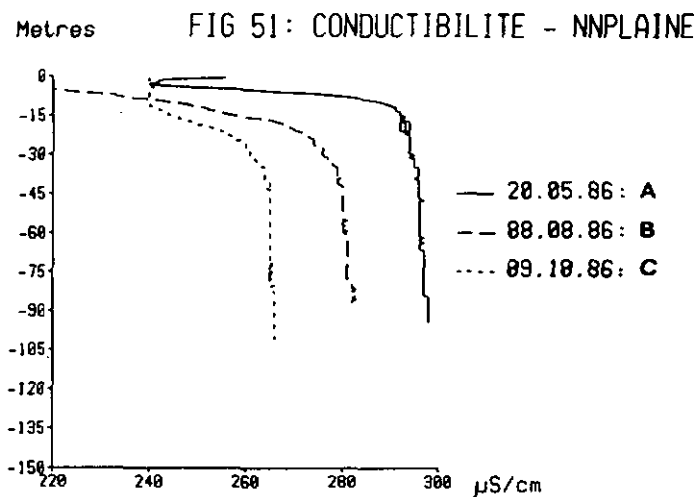


FIG. 51: Atténuation de la conductibilité aquatique en cours de saison.

FIG 53 A: CONDUCTIBILITE - 20.08.85

Metres

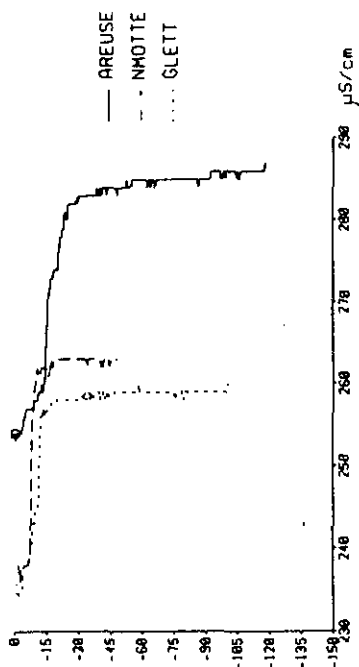


FIG 53 B: CONDUCTIBILITE - 20.08.85

Metres

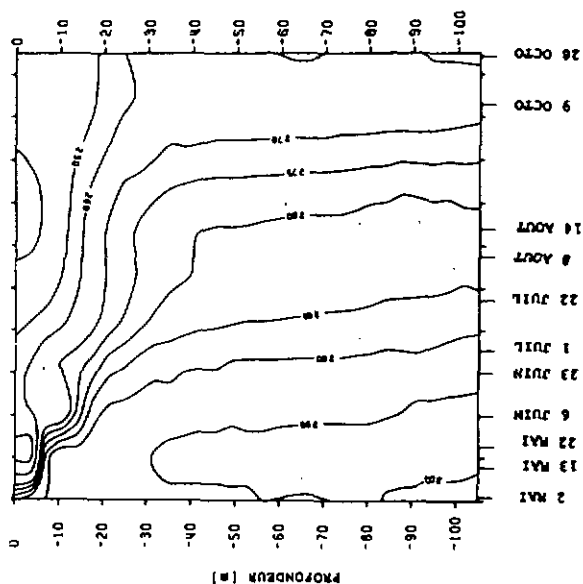


FIG. 52: Evolution verticale de la conductibilité au cours de l'année 1986 sur la station NWPLAINE.

FIG. 53:A-B: Diminution transversale de la conductibilité entre la rive NW (AREUSE - AUBIN) et la rive SE (GLETT - ESTA).

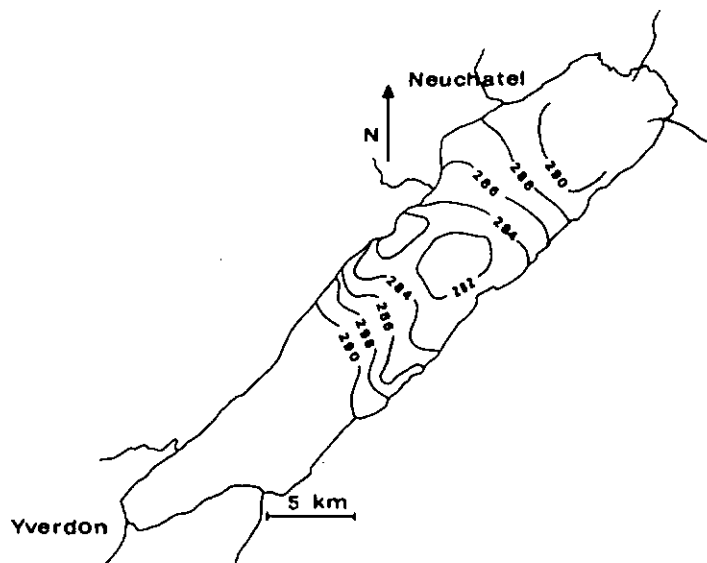


FIG. 54: Courbes isoplèthes de la conductibilité à 5 m de profondeur, le 21 juin 1985.

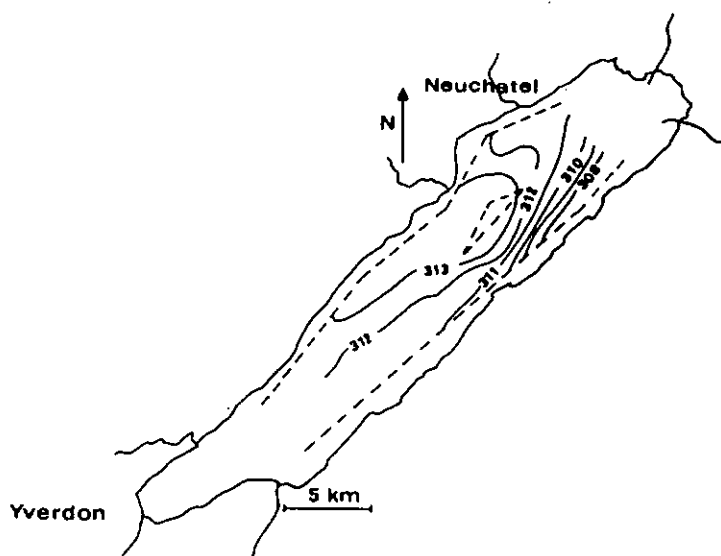


FIG. 55: Courbes isoplèthes de la conductibilité à 50 m de profondeur, le 18 septembre 1985.

Mètres

FIG 56: CONDUCTIBILITE - 01.07.86

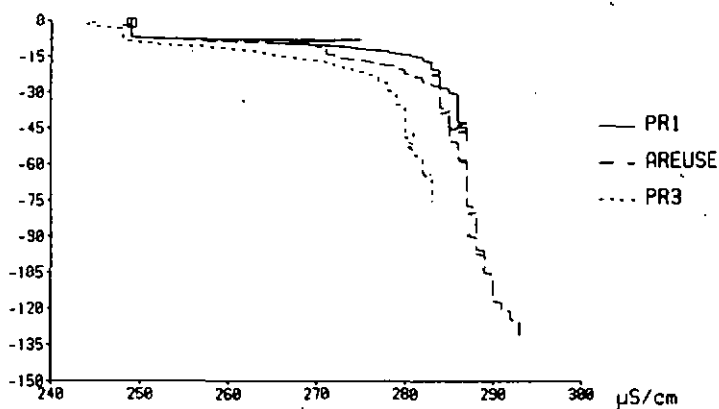


FIG. 56: Diminution de la conductibilité lacustre à partir de l'embouchure de l'Areuse (PR1) vers le large (PR3).

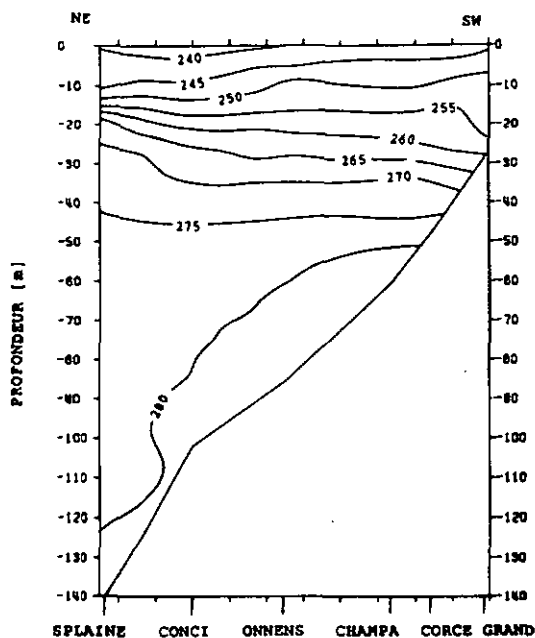


FIG. 57: Influence bathymétrique sur le comportement des lignes d'iso-conductibilité dans une coupe verticale du haut-lac, le 25 juillet 1986 (Echelle horizontale: 1 cm = 1.306 km).

E. Conclusion

L'appréciation et la compréhension des interdépendances entre les paramètres physico-chimiques conduisent à formuler une description annuelle du comportement biologique, minéralogique et sédimentologique du milieu lacustre dont l'interprétation ultérieure pourra être soutenue par l'analyse turbidimétrique. En effet, à l'aube d'un nouveau cycle limnologique (à la fin de l'hiver), le soleil réchauffe la surface du lac. La capacité nutritive étant suffisante, les populations algaires peuvent se développer très rapidement dans la zone photique. La photosynthèse de ces organismes va produire une sursaturation d'oxygène dans l'épilimnium et engendrer une grande consommation de gaz carbonique. Parallèlement à son assimilation chlorophyllienne, le CO_2 peut aussi s'échapper dans l'atmosphère à la suite de l'élévation thermique; la prédominance d'un de ces deux processus sur l'autre n'est toutefois pas aisée à démontrer (Kelts and Hsu, 1978). Leur complicité procure en tous cas une élévation du PH et une diminution de la conductibilité (Fig. 58) qui vont créer de nouvelles conditions physico-chimiques pour l'indice de saturation de la calcite et sa précipitation ultérieure.

Durant l'été, la tranche épilimnique réchauffée s'épaissit progressivement. Elle est accompagnée par une amplification simultanée de la couche supérieure moins conductrice. La thermocline est soulignée par une forte consommation d'Oxygène et un abaissement du PH (Fig. 59); ces deux derniers phénomènes, tributaires des réactions de dégradation des particules organiques en décantation et provisoirement ralenties sur le gradient de viscosité, se raffermissent jusqu'en automne (Fig. 29).

A proximité du fond, l'évolution estivale voit également l'amplification de processus amorcés à la fin du printemps: consommation d'Oxygène, abaissement du PH et légère élévation de la conductibilité (Fig. 59 - 29). Le développement simultané de ces nouvelles conditions physico-chimiques pourra être mis en relation avec l'individualisation d'une couche néphéloïde profonde (chap. III.4).

Bien que la plupart des réactions demeurent épilimniques, leurs conséquences se répercutent ainsi sur toute la colonne d'eau. A leur mort, les particules planctoniques se décantent, accompagnées des néocristaux de calcite; lors de leur minéralisation, elles enrichissent les couches profondes en CO_2 et consomment de l'oxygène. Tout au long de l'année (Fig. 58 - 59 - 29), les variations thermiques, l'alternance des populations phyto- et zooplanctoniques caractérisées par les fluctuations de l'oxygène dissous et du PH, la précipitation des carbonates déterminée indirectement par la diminution de la conductibilité de l'eau et les brassages hydrodynamiques de surface vont ainsi conditionner le comportement quantitatif et qualitatif des particules en suspension dans le lac de Neuchâtel.

FIG 58: NNPLAINE - 20.05.86

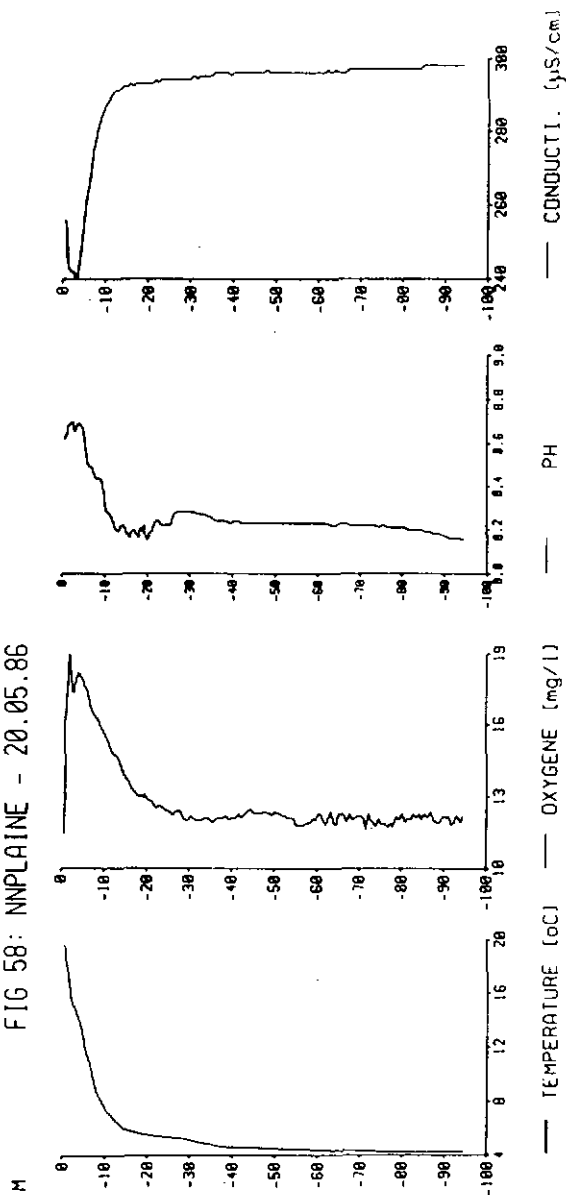


FIG. 58: Conjonction des variations verticales des conditions hydrologiques épilimniques printanières.

FIG 59: SPLAINE - 14.08.86

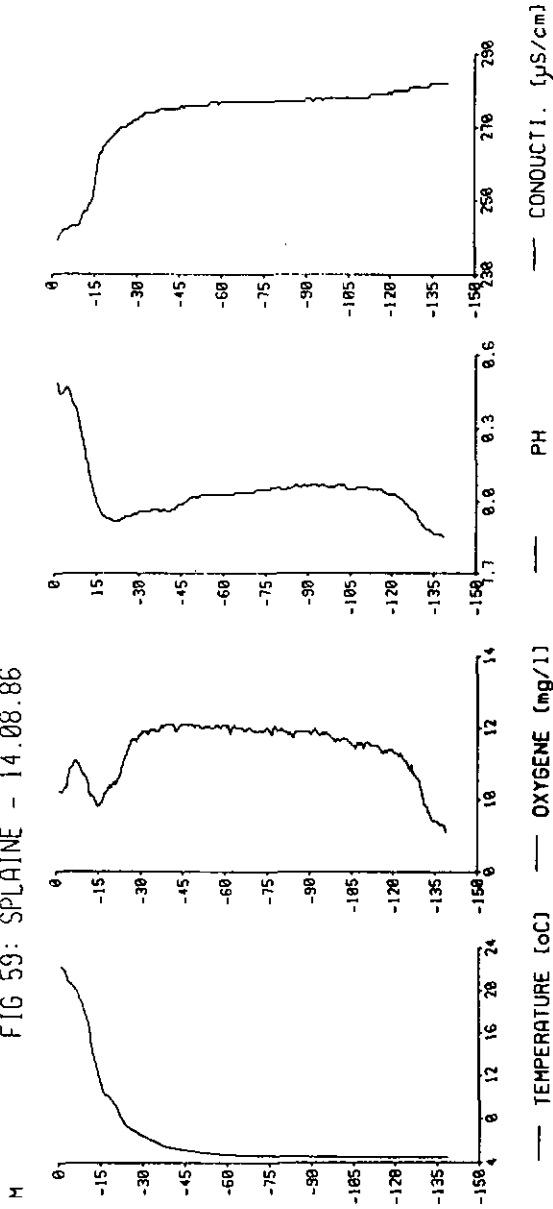


FIG. 59: Conjonction des variations verticales des conditions hydrologiques estivales dans le métalimnium et à proximité du fond.

III. TURBIDIMETRIE

III.1 La concentration particulaire.

A. Méthodologia

Les échantillons sont récoltés avec une bouteille océanographique "Niskin" de 10 litres. Après le prélèvement, un litre de solution est soustrait du volume total et immédiatement formolé. La détermination quantitative des particules solides est ensuite réalisée le plus rapidement possible en laboratoire. L'échantillon est filtré sur une membrane SARTORIUS de 47 mm de diamètre et 0.45 μ m de porosité, selon les méthodes régulièrement employées en océanographie (Manheim et al., 1970; Meade et al., 1975; Drake, 1977). La concentration particulaire est déterminée par la pesée du filtre chargé et desséché à laquelle on soustrait son poids initial mesuré sous des conditions strictement identiques. La pesée du filtre en nitrate de cellulose est effectuée après l'avoir soumis à un rinçage préliminaire à l'eau distillée, à une exposition d'une heure dans une étuve à 105 °C et à une stabilisation thermique dans un dessiccateur pendant 2 heures.

B. Résultats

L'évolution annuelle de la charge particulaire du lac a été abordée par la récolte mensuelle d'échantillons entre avril 1984 et mars 1985, selon le calendrier déjà décrit (Tableau 1: chap. I.2.A). L'analyse se réfère à 174 échantillons dont la profondeur, la localisation et la période de prélèvement sont différentes. La moyenne générale de la concentration des particules en suspension dans le lac de Neuchâtel se situe à environ 1.6 mg/l; en comparaison, le Léman compte 1.8 mg/l et le lac de Zürich 2.2 mg/l. Le lac de Brienz, tributaire d'apports fluviaux considérables, peut atteindre 25 mg/l (Sturm, 1985). Toutefois, au-delà d'une moyenne annuelle théorique, la concentration des M.E.S. évolue considérablement en cours de saisons. La charge est importante en juillet et les plus faibles teneurs se rencontrent en décembre (Fig. 60). De plus, lors de chaque campagne, la répartition verticale moyenne est très hétérogène; elle évolue mensuellement de manière individuelle dans chaque couche d'eau (Fig. 61 - 62). Sur une seule station, l'observation de l'évolution annuelle de la concentration particulaire des isobathes permet d'illustrer les époques où règne une similitude ou une disparité entre l'épilimnium (5 m) et les couches profondes (Fig. 63).

C. Discussion

L'origine des particules en suspension dans un lac peut être allochtone ou autochtone. Leur concentration dépend de l'évolution des sources d'apport (affluents, atmosphère, etc.), des processus chimiques internes (précipitation, coagulation) et du développement planctonique. De plus, des remises en suspension et des éboulements subaquatiques

peuvent aussi enrichir les couches aquatiques profondes en matières solides. Les effluents, par contre, amenuisent le bilan particulaire du milieu lacustre (Sturm, 1985). L'approche des apports allochtones n'a pas été abordée dans toute son acuité. En effet, le bassin du lac de Neuchâtel compte un très grand nombre de petits affluents, quelques rivières moyennes, mais aucune source fluviale prédominante susceptible de réunir une part prépondérante des matériaux détritiques. De plus, l'évolution annuelle des débits et des charges de tous ces cours d'eau subit d'innombrables et intenses fluctuations tributaires des conditions météorologiques. Une étude exhaustive aurait donc nécessité un échantillonnage en continu de plusieurs rivières en cours d'année, ce qui serait considérablement sorti du cadre de ce travail. Il est ainsi rapidement apparu utopique de vouloir tenter d'établir un bilan annuel sérieux des apports particuliers. Toutefois, des prélèvements mensuels dans les 5 plus importants affluents et dans l'émissaire de la Thielle ont permis de déceler le cadre dans lequel pouvait évoluer la charge des cours d'eau périalacustres. En-dehors des périodes de crues (orages, tempêtes: Areuse - novembre 83, fonte des neiges, etc.), l'intensité des apports détritiques sous forme particulière demeure très faible (Tableau 4).

TABEAU 4: Mesures mensuelles de la concentration en M.E.S. (en mg/l) des 3 principaux affluents du lac de NEUCHÂTEL et de son exutoire du canal de la Thielle.

MOIS	AREUSE	THIELLE	BROYE	THIELLE (canal)
25.08.83	3.78	2.52	7.57	7.55
31.10.83	0.71	2.38	2.20	4.29
29.11.83	22.75	-	5.55	8.84
23.01.84	1.39	2.24	-	10.75
27.04.84	5.38	5.62	9.47	5.03
25.05.84	7.00	2.80	8.31	7.85
15.06.84	2.00	2.68	7.52	5.13
09.07.84	3.28	3.25	8.40	4.42
03.08.84	2.40	3.16	8.44	3.32
07.09.84	5.85	3.22	11.52	5.68
02.11.84	3.04	3.40	3.78	2.17
05.12.84	0.77	2.28	2.28	4.66

Dans le lac proprement dit, nous avons déjà noté la prépondérance de l'activité phytoplanctonique printanière qui régit l'état physico-chimique des eaux de surface. De même, nous avons suggéré que la diminution estivale de la conductibilité était due à la précipitation des carbonates de calcium. Bien que nous ne débattions que plus tard de la nature et du comportement des particules autochtones (chap. V.3), il apparaît clairement qu'elles influencent directement la concentration des particules en suspension. Au printemps (mai et juin), la charge maximale est épilimnique (Fig. 61-63-64); c'est surtout du phytoplancton. En juillet, la concentration s'homogénéise à travers les différentes couches d'eau par la décantation des particules biologiques qui vivaient dans la zone photique et par la précipitation des microcristaux carbonatés (Fig. 61-63-64). En août, la concentration particulaire subit une diminution généralisée (Fig. 63), alors qu'en septembre, une reprise sensible caractérise l'ensemble de la colonne d'eau (Fig. 62-63-64). Vers l'arrière-automne, les brassages dynamiques produisent une excellente homogénéisation.

En décembre, la concentration moyenne s'atténue distinctement (Fig. 63), à l'exception de l'eau hypolimnique de la vallée méridionale du lac (Station D) (Fig. 64). Il arrive en effet que de fortes densités particulaires puissent apparaître épisodiquement et localement à proximité du fond. Elles nous conduiront à postuler, avec l'aide de l'observation des profils turbidimétriques, l'existence de courants sous-lacustres capables d'engendrer des remaniements ou des remises en suspension des sédiments d'interface.

Le 4 juillet 1984, une campagne d'échantillonnage de 14 stations réparties sur tout le lac a permis de réaliser une couverture globale du lac. La concentration moyenne atteignait alors 1.9 mg/l. Au-delà du plateau côtier (plus de 30 m de profondeur), la charge particulaire de l'eau du fond diminue avec l'augmentation de la profondeur du site de prélèvement (Fig. 65). Seules les stations III B et III D, à l'embouchure profonde de l'Areuse et au large de Portalban, présentent un écart vers des concentrations plus prononcées. Elles atteignent environ 2.2 mg/l alors que les autres stations de profondeur comparable ne dépassent guère 1.0 mg/l. Échantillonnées durant les campagnes mensuelles, ces deux stations présentent toutefois régulièrement des charges plus élevées. L'atténuation vers les zones de grande profondeur pourrait s'expliquer par la vitesse de chute de la "pluie" particulaire qui atteindrait plus tardivement ces aires sédimentaires (voir chap. III.4.B).

A cette date, le volume équatique du lac (14 km³) contient plus de 25000 tonnes de matières solides en suspension; sa moyenne annuelle, calculée sur la base d'une concentration voisine de 1.6 mg/l, s'élèverait à 23000 tonnes.

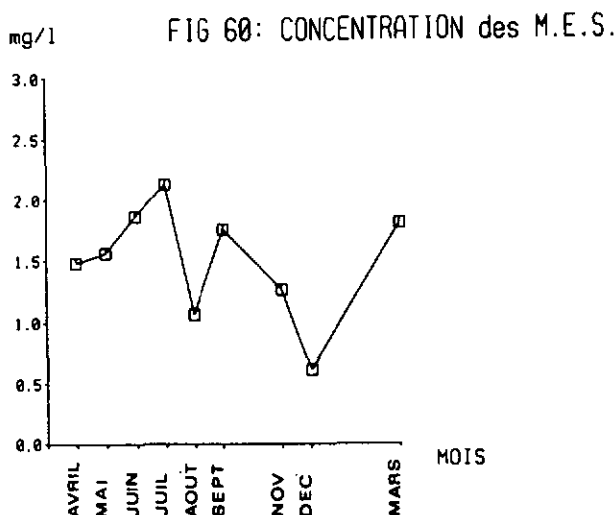


FIG. 60: Evolution annuelle de la concentration moyenne des particules en suspension dans le lac de Neuchâtel obtenue par l'analyse mensuelle de 18 échantillons récoltés sur le profil III (FIG. 8) et les 5 stations de pompage périlacustres.

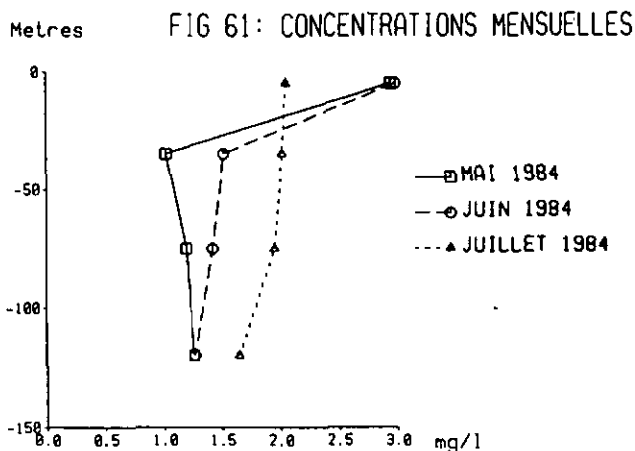


FIG. 61: Evolution verticale de la concentration moyenne des M.E.S. lors des campagnes mensuelles de mai, juin et juillet 1984; elle est calculée à partir des échantillons du profil III (à 5 - 30 - 80 m et à 1 m du fond) et des 5 stations de pompage (30 m).

Metres FIG 62: CONCENTRATIONS MENSUELLES

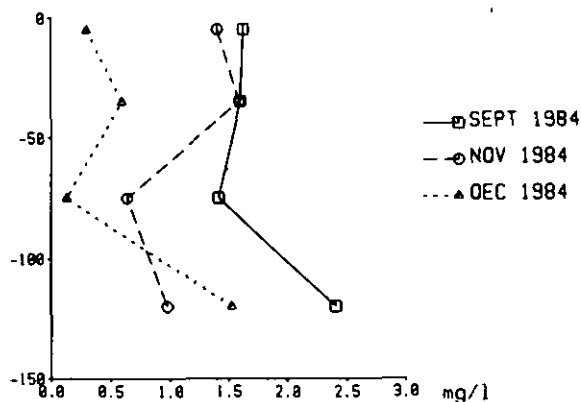


FIG. 62: Evolution verticale de la concentration moyenne des M.E.S. lors des campagnes mensuelles de septembre, novembre et décembre 1984; elle est calculée à partir des échantillons du profil III (à 5 - 30 - 80 m et à 1 m du fond) et des 5 stations de pompage (30 m).

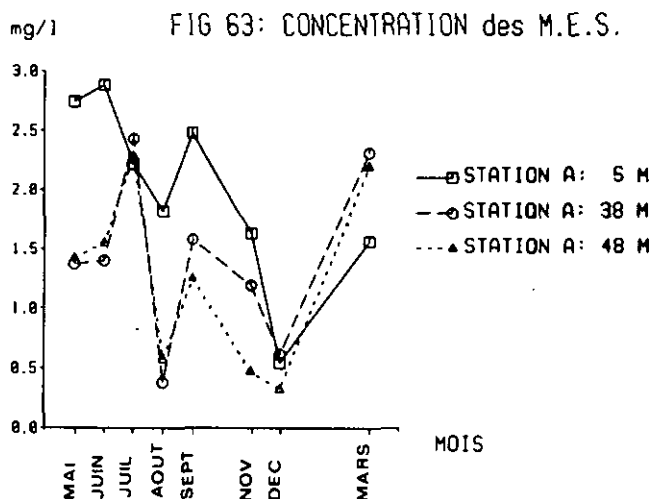


FIG. 63: Evolution annuelle de la concentration à la station III A, proche de l'embouchure de l'Areuse (FIG. 8).

FIG 64 A: 22 MAI 1984

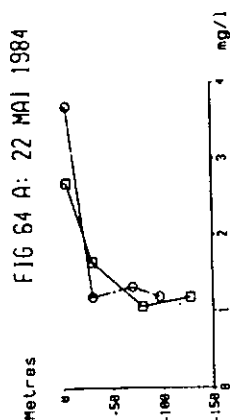


FIG 64 D: 12 NOVEMBRE 1984

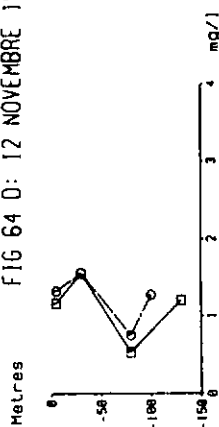


FIG 64 B: 4 JUILLET 1984

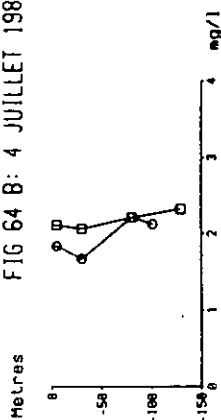


FIG 64 E: 5 DECEMBRE 1984

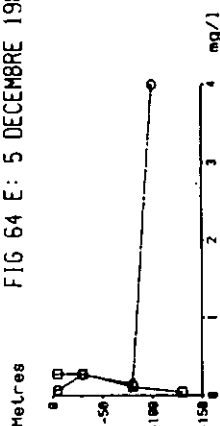


FIG 64 C: 14 SEPTEMBRE 1984

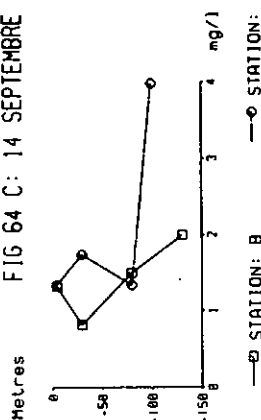


FIG 64 F: 13 MARS 1985

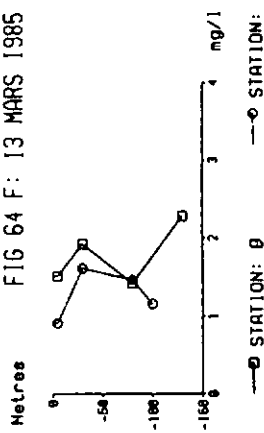


FIG. 64: Concentrations mensuelles des M.E.S. sur les stations III B (vallée profonde NW) et III D (vallée profonde SE).

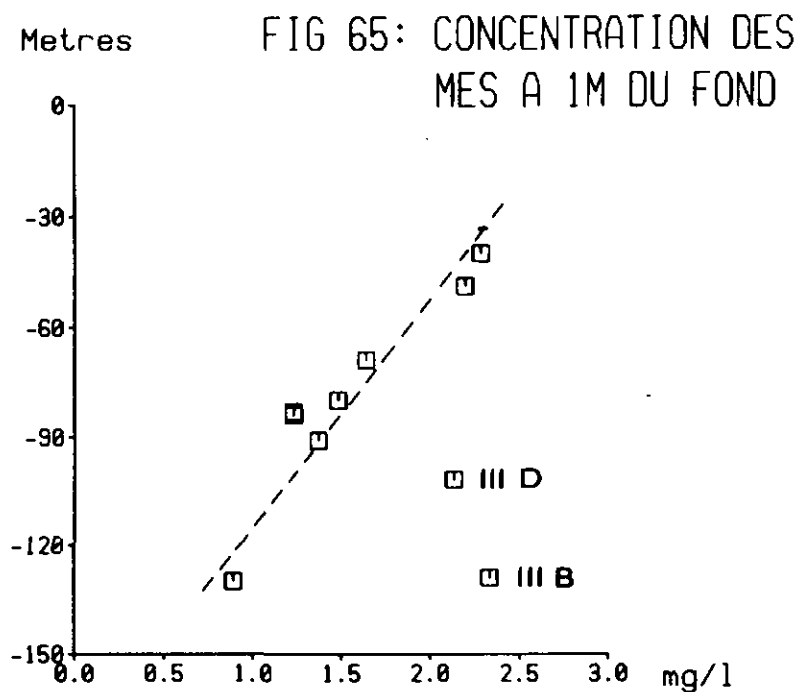


FIG. 65: Concentration des particules en suspension à 1 m du fond du lac selon la profondeur de la station, le 4 juillet 1984.

III.2 Le turbidimètre

A. Le principe de mesure.

Les mesures de la turbidité sont réalisées avec un Diffusiomètre Intégrateur Léger (DIL) associé à la sonde originale HPTC-84 de Züllig AG. Il a été construit par cette même entreprise, selon la conception de PROSPER, groupe de recherche océanographique associé à l'Université de Neuchâtel, qui a lui-même bénéficié des expériences réalisées en France, au LPCM de Villefranche-Sur-Mer par D. Prieur (F. Nyffeler, comm. pers.). L'acquisition des résultats et leurs traitements graphiques sont similaires à ceux des paramètres physico-chimiques.

Le diffusiomètre, ou néphélomètre, évalue la concentration des particules en suspension à partir de leur diffusion lumineuse. Un pinceau lumineux rouge collimaté traverse un échantillon diffusant (eau lacustre, marine, etc.) d'épaisseur fixée. On mesure alors la variation d'intensité des rayons "directs" due à l'absorption et la fraction de lumière diffusée sous un petit angle (2 à 5 degrés). Pour les faibles concentrations particulaires, le rapport du flux diffusé au flux direct est proportionnel au coefficient de diffusion du milieu observé.

L'appareil est constitué de deux caissons étanches où sont logés les blocs "source" et "réception", ainsi que l'électronique associée. Trois colonnettes les relient rigidement et permettent le maintien et le centrage d'un diaphragme médian. L'appareil est alimenté au moyen d'un connecteur étanche dont deux contacts sont utilisés pour la transmission des signaux. Le "point source", placé dans le plan focal d'une lentille plan convexe, est constitué par une pastille diffusante collée sur un diaphragme et éclairée au moyen d'une diode lumineuse. Le diamètre du faisceau est déterminé par un diaphragme accolé à la lentille. Deux photo-diodes mesurent le flux direct et les rayons lumineux diffusés sous un angle compris entre 2 et 5 degrés (C.-H. Godet, comm. pers.).

B. L'étalonnage.

Les premiers essais d'étalonnage électronique ont été réalisés avec des solutions d'eau dégazée chargées de différentes concentrations de particules minérales, le plus souvent avec des argiles. Malheureusement, l'homogénéisation consécutive aux rejouts successifs de nouvelles concentrations n'a jamais permis d'obtenir des résultats probants. Malgré un intense brassage réalisé par un dispositif en circuit fermé engendré par une pompe péristaltique, la turbidité de l'eau d'étalonnage subissait une constante atténuation avec le temps, après avoir atteint un maximum quelques minutes après un nouvel apport particulaire. Cette diminution pouvait même conduire les mesures à des valeurs inférieures à celles de la concentration précédente. Aucune explication unilatérale n'a pu être formulée pour expliquer cette disparition progressive des particules en suspension. Il nous parut ainsi illusoire de poursuivre la réalisation d'un étalonnage

direct entra les mesures électronique et les concentrations particulières. C'est pourquoi nous avons passé par une étape intermédiaire, caractérisée par la mesure électronique de concentrations turbidimétriques produites par une solution chimique. Il s'agit d'une solution colloïdale de FORMAZINE, mélange de 5 g de Sulfate d'Hydrazine ($N_2 H_6 SO_4$) et de 50 g d'Hexaméthylène tétramine ($C_6 H_{12} N_4$) dans 1 litre d'eau bidistillée filtrée (Rodier, 1978). Cette solution correspond à 4000 FTU (FORMAZIN TURBIDITY UNIT).

L'étalonnage est basé sur l'adjonction répétée de 0.5 ml de cette solution dans 2.5 l d'eau filtrée et dégazée pour empêcher la formation de bulles. La courbe (Fig. 66) est parfaitement linéaire pour des concentrations inférieures à 4.8 FTU, domaine englobant largement les valeurs turbidimétriques du lac de Neuchâtel. Cependant, la relation expérimentale avec le poids sec des particules en suspension est très complexe. Elle dépend étroitement des propriétés physiques des particules et de leur composition, organique ou minérale. Or, les particules de l'épilimnium sont essentiellement composées d'organismes planctoniques qui produisent une diffusion lumineuse différente de celles des particules hypolimniques, à majorité minérales. Toutefois, à la suite de nombreuses mesures turbidimétriques concertées avec des pesées de résidus secs, il nous paraît convenable, à titre indicatif, d'attribuer une relation expérimentale proche de l'équation suivante:

$$CONC \text{ (mg/l)} = 1.7 * CONC \text{ (FTU)}$$

Cette relation est satisfaisante lorsque les particules en suspension sont essentiellement minérales. En effet, lors de mesures en laboratoire sur des eaux troubles récoltées en hiver dans le canal de la Thielle et mélangées selon diverses proportions avec de l'eau de robinet, la relation expérimentale est remarquablement constante autour de 1.7. Par contre, lors de mesures in situ dans le lac en juillet 1985, elle dépasse nettement 2.0 dans les couches superficielles riches en plancton; elle se rapproche à nouveau de 1.7 en profondeur, lorsque les particules minérales redeviennent prépondérantes. De même, les mesures acquises lors de missions océanographiques en Méditerranée ont révélé des difficultés semblables pour établir une bonne corrélation entre les concentrations particulières et les appréciations turbidimétriques. Cependant, ces fortes distorsions deviennent plus compréhensibles quand on apprend que des disparités importantes apparaissent déjà entre la pesée de plusieurs filtrations successives du même échantillon récolté lors de ces mêmes missions océanographiques (Aloisi; com. pers.).

III.3 Observations et définitions

Les mesures du diffusionomètre intégrateur limnologique (DIL) permettent de poursuivre et d'affiner les analyses de la concentration des particules en suspension réalisées par la pesée des résidus de filtres, d'en suivre l'évolution verticale et surtout d'établir des relations avec les conditions physico-chimiques du milieu. Au cours des deux années d'observation, de mai à octobre, tous les profils présentent une évolution verticale globale comparable: forte opacité de surface, clarté maximale au sommet de l'hypolimnium (vers 30 m) avec légère augmentation de la charge particulaire dans les couches subséquentes ou seulement à proximité du fond. Suivant l'exemple des océanographes (Biscaye and Eittem, 1977; Nyffeler et al., 1984), 4 niveaux turbiditiques de la colonne d'eau du lac de Neuchâtel ont pu être établis (Fig. 67):

1. L'EPILIMNIUM: Couche qui, selon la définition limnologique habituelle, englobe la partie supérieure du lac soumise à de grands écarts thermiques, une intense productivité biologique, une précipitation minérale et une influence des vagues. Il est limité à sa base par un saut thermique estival nommé "Métalimnium".

2. La CLEAR WATER LAYER (CWL): Couche sous-jacente dont l'amplitude dépend du développement de la stratification thermique. Au printemps, elle s'individualise au-dessous des effets épilimniques, au-delà de 30 m de profondeur et peut s'enfoncer jusqu'à proximité du fond. Au début de la période estivale, elle est réduite à quelques mètres d'épaisseur; elle se confond alors approximativement au métalimnium thermique. Dès cette époque, son amplitude se remet à croître. La couche claire se développe à partir du métalimnium, s'amplifie en suivant la décantation particulaire et atteint à nouveau les niveaux profonds à l'approche de l'automne; elle retrouve ainsi une structure semblable à celle du printemps.

3. La PELAGIC NEPHELOID LAYER (PNL): Couche profonde subissant une augmentation turbiditique postérieurement à l'établissement de la stratification thermique et qui constitue une deuxième masse d'eau d'identité propre. Elle pourrait être engendrée par la minéralisation des particules de dégradation algale qui se décantent ou par la croissance des micro-cristaux de carbonates précipités dans l'épilimnium (Portner, 1951).

4. La BENTHIC NEPHELOID LAYER (BNL): Couche de fond, d'une épaisseur maximale de 30 à 40 m, qui peut être en proie à de très fortes élévations de la charge particulaire. Sa limite supérieure est soulignée par un niveau de turbidité minimale, le CLEAR WATER MINIMUM (CWM).

FTU (DIL) FTU (DIL) : FTU (THEORIQUE)

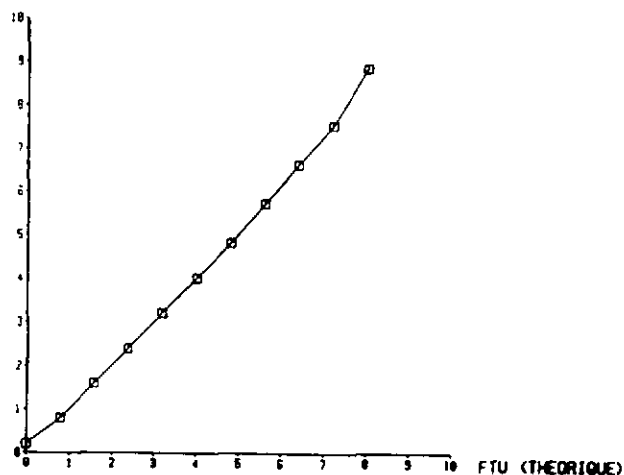


FIG. 66: Courbe d'étalonnage turbidimétrique (FTU) du diffusiomètre intégrateur limnologique (DIL) avec la concentration théorique d'une solution de Formazine dans 2.5 litres d'eau filtrée.

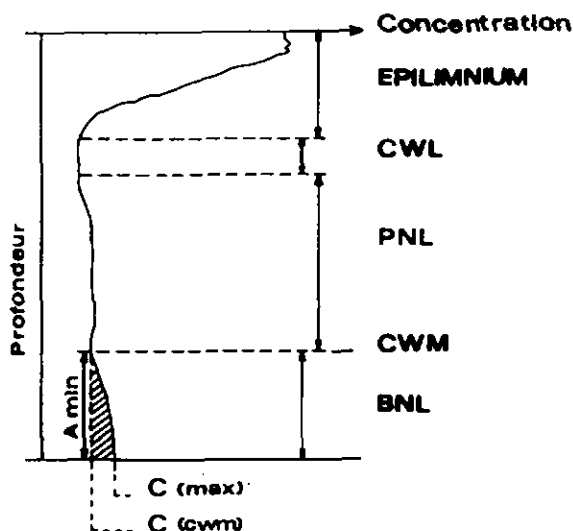


FIG. 67: Paramètres structuraux d'un profil turbiditique typique caractérisé par une forte couche benthique néphéloïdale (BNL).

III.4 Résultats et discussion

A. L'épilimnium:

1. Présentation des résultats:

Au seuil du printemps, la colonne aquatique est complètement claire. Puis, après un premier échauffement thermique, une intense prolifération algale se développe à la surface du lac (Wütrich, 1965; Pokorny, 1983, 1984). Elle induit une opacité de l'eau qui peut atteindre une turbidité de 4 à 5 FTU (Fig. 68). A certains endroits, la densité particulaire s'élève même au-delà de 6 FTU, mais les valeurs d'enregistrement ne sont alors qu'indicatives car elles dépassent l'intervalle de la droite d'étalonnage. Durant le mois de mai, la population phytoplanctonique atteint son développement maximal (Fig. 69 A).

Elle subit ensuite jusqu'en juillet un déclin qui peut être causé par la collusion de plusieurs phénomènes: diminution des réserves nutritives, intensification zoologique ou encore brutales perturbations météorologiques. Nous avons montré que ces dernières sont capables d'engendrer d'intenses répercussions sur la physico-chimie aquatique de surface (Fig. 13 - 25 - 40). Or la turbidité de l'épilimnium dépend directement du développement des micro-organismes vivants, eux-mêmes tributaires des conditions hydrologiques superficielles. Ainsi, tout comme en 1985 (Bapst et Rübner, 1987), une perturbation météorologique de l'évolution turbidimétrique printanière a été mise en évidence en juin 1986. Entamé au cours du mois de mai (Fig. 69 B), le déclin de la population algale, ou sa dilution, s'amplifie brutalement le 6 juin (Fig. 70 A) alors que des vents violents balayent la surface du lac. A la fin du mois, le retour au calme et l'augmentation thermique favorisent la réalisation de la fin du "bloom" planctonique de surface (Fig. 70 B).

Lors des deux années d'observation, l'épilimnium a présenté une structure turbidimétrique plus complexe au début juillet. Au-dessous de la couche néphéloïde de surface, un deuxième pic de forte intensité particulaire s'individualise entre 10 et 20 m de profondeur (Fig. 71 A - B - C). Comme une forte consommation d'oxygène a été mesurée simultanément, son origine pourrait être due à l'éclosion du zooplancton vivant à ce niveau et qui va provisoirement supplanter les populations végétales.

A partir de la mi-juillet, les conditions climatiques estivales susceptibles de conditionner la précipitation carbonatée (Portner, 1951) et de provoquer une deuxième explosion algale tardive-estivale (Wütrich, 1965) vont maintenir une forte opacité épilimnique jusqu'en automne (Fig. 72); seules de légères oscillations temporaires pourront la perturber.

A la fin octobre (Fig. 73), l'intensité néphéloïdale de la

couche superficielle s'atténue fortement alors que son épaisseur s'accroît distinctement. A cette même époque, des complications imprévisibles viennent s'ajouter sur de nombreuses stations par de brusques variations verticales de la turbidité jusqu'au voisinage de 50 m (Fig. 74). L'interprétation d'une telle structure demeure incertaine (voir plus loin).

2. Discussion des résultats:

L'évolution estivale de la turbidité des eaux superficielles du lac de Neuchâtel dépend essentiellement des processus biologiques et chimiques internes; les apports fluviaux apparaissent très ténus durant cette période. Toutefois, leur influence sur la concentration des particules en suspension est difficilement décelable, surtout si l'accent n'est pas mis sur une étude deltaïque fine. Pourtant, en mai 1986, l'influence thermique (Fig. 20) et turbiditique (Fig. 75) de l'Areuse est encore identifiable à une distance appréciable de son embouchure (voir carte: Fig. 10). A cette même époque, l'intrusion de la Mentue peut également s'observer sur une station lacustre (Fig. 76). De même, en juillet, la stratification turbiditique du haut-lac est perturbée par les apports de la Thielle, de la Mentue et de l'Arnon (Fig. 77: A) alors que les caractéristiques estivales typiquement lacustres sont préservées sur les stations profondes plus éloignées (Fig. 77: B). On voit ainsi, malgré les faibles intensités détritiques des M.E.S., qu'il pourrait parfois être concevable d'étudier le mélange et les interactions deltaïques des eaux lacustres avec celles d'un affluent. A la fin de ce chapitre, nous présenterons une illustration remarquable d'une telle structure à l'embouchure méditerranéenne du Rhône, en été 1986 (Fig. 84: A).

B. L'hypolimnium:

Selon le schéma structural de la colonne aquatique du lac de Neuchâtel défini précédemment (Fig. 67), l'ensemble hypolimnique va rassembler la CWL (CLEAR WATER LAYER), la PNL (PELAGIC NEPHELOID LAYER) et la BNL (BENTHIC NEPHELOID LAYER). La turbidité de ces différentes couches présente des variations saisonnières appréciables, directement tributaires des phénomènes qui régissent la concentration particulière de l'épilimnium. Dans le but d'éviter des répétitions, la présentation mensuelle des résultats sera directement suivie d'une discussion ou d'une interprétation (précédées par une *).

Lors des premières observations annuelles, en mai, la majeure partie de la masse hypolimnique est composée d'eau claire, très peu chargée, avec une turbidité voisine de 0.4 FTU. Cependant, conjointement à l'explosion particulière de surface, la concentration métalimnique établit un lien entre cette couche opaque et la CWL profonde. La turbidité décroît d'abord fortement à la base de l'épilimnium, puis très légèrement avant d'atteindre le sommet de la masse d'eau claire (Fig. 68 - 69 - 78: A).

* L'identification de cette couche transitoire de turbidité

peut provenir de la décantation préliminaire des particules de surface épargnées des processus de dégradation, moins actifs qu'en période estivaux. Elle initialise le mécanisme qui va augurer le comportement turbidimétrique des couches profondes durant l'été.

A proximité du fond, la BNL (BENTHIC NEPHELOID LAYER) est encore généralement inexistante (Fig. 78: A) ou très réduite sur le fond (Fig. 68 - 69 B). Exceptionnellement, au cours de la campagne du 2 mai 1986, une BNL nette de 20 m d'épaisseur occupe la base de la vallée NW du lac et de la plaine neuchâteloise (Fig. 69 A - 75: A - B). Elle disparaît presque complètement en 4 jours (Fig. 68) et n'apparaît plus qu'une seule fois (6 juin 1986) durant les 6 campagnes ultérieures échelonnées jusqu'à la fin juin (Fig. 69 B - 70 A).

* Le caractère éphémère de cette structure tendrait à lui attribuer une origine dynamique, en relation avec les conditions météorologiques de surface. Il est tout à fait plausible que les eaux superficielles, balayées par des vents d'Ouest, génèrent en retour un courant de fond, capable de produire une remise en suspension des particules d'interface.

Vers la fin de cette période printanière (20 juin 1985 - 23 juin 1986), une augmentation générale de la turbidité a été observée sur toute la colonne d'eau (Fig. 70 B - 78: B). Cet enrichissement particulaire conditionne l'élaboration de la PNL (PELAGIC NEPHELOID LAYER) qui s'individualise entre l'épilimnium et l'interface sédimentaire ou jusqu'à sa supplantation par la BNL. En effet, dès cette époque, une couche benthique néphéloïde estivale commence à se développer. En 1985, elle est encore locale; elle est restreinte au profil Saint-Aubin / Estavayer-le-Lac et aux stations de la vallée Sud du lac (Fig. 78: B - 79). Elle demeure insignifiante partout ailleurs.

* L'apparition rapide de la PNL résulte très certainement d'un brusque accroissement de la décantation des organismes de surface causé par la soudaine apparition de conditions hydrologiques néfastes (Bapst et Kübler, 1987). La diversité des tailles et des densités particulières détermine leur vitesse de sédimentation et engendre une homogénéisation de leur répartition sur l'ensemble de la colonne d'eau.

Au début juillet, au cours des deux années d'observations, la BNL se généralise à l'ensemble des stations du lac (Fig. 71). Elle atteint une trentaine de mètres d'épaisseur et une concentration proche de 1.5 mg/l. Une CWL (CLEAR WATER LAYER) encore très réduite apparaît en-dessous de l'épilimnium. Elle est immédiatement relayée par la PNL dont l'intensité turbidimétrique augmente avec la profondeur jusqu'à sa disparition sous l'influence dominante de la BNL (Fig. 71: A).

* L'apparition de la CWL coïncide avec la multiplication des pics superficiels de turbidité certainement causés par l'apparition du zooplancton. Cette nouvelle population est susceptible d'absorber une grande proportion des particules végétales mortes et de réduire d'autant le flux particulaire

de sédimentation. De plus, à cette même époque, une couche appauvrie en oxygène et marquant une atténuation du PH commence à se développer sur ce même niveau (Fig. 26 - 38). L'avènement de cette diminution turbidimétrique s'élabore au sommet de la colonne hypolimnique, à la base de l'épilimnium. Ainsi, comme au début juillet la consommation particulaire vient de débiter, l'amplitude de la CWL demeure très ténue. La PNL illustre la réminiscence des particules en cours de décantation et qui avaient pu transiter par le métalimnium avant l'avènement de l'ensemble zoologique. L'explication de la généralisation de la BNL, amorcée en juin, devient malaisée. A cette époque, en effet, la stratification thermique est bien établie et l'intensité du régime des vagues de surface s'est fortement résorbée. Il devient donc douteux d'évoquer un courant sous-lacustre amorcé par le comportement météorologique superficiel. De même, l'explication par une résultante dynamique profonde due à l'établissement différentiel de la stratification thermique suggérée par Chambers et Eadie (1981) pour l'élaboration d'une telle structure dans le lac Michigan nous paraît difficilement transposable dans le lac de Neuchâtel.

Par contre, l'existence simultanée de la BNL et des variations hydrologiques (diminution de la concentration en O₂ dissous et du PH, augmentation de la conductibilité) nous amène à formuler l'hypothèse de réactions bactériologiques ou biogéochimiques susceptibles d'enrichir les couches profondes en matériel particulaire (Fig. 80).

Vers la fin du mois, l'épaisseur de la couche benthique s'atténue (< 15 m). La PNL maintient son identification entre elle et la CWL qui s'est amplifiée depuis la campagne précédente (Fig. 77: B - 81).

* L'augmentation de l'amplitude de la couche claire (CWL), dirigée vers la profondeur, permet d'illustrer et de suivre la vitesse de chute des particules en suspension. Entre le 4 et le 25 juillet, la base de la CWL a passé de 30 à 50 m de profondeur (Fig. 82 A et B); elle a ainsi repoussé le toit de la PNL d'une vingtaine de mètres en 21 jours, soit à une vitesse approximative de 1 m/jour.

L'ensemble de ces observations permet de démontrer l'existence d'une stratification particulaire imprimée sur la stratification thermique. Dans l'épilimnium, elles suivent un comportement similaire; dans la masse hypolimnique supérieure, la structure de la charge en suspension est plus complexe avec son évolution saisonnière de la CWL et de la PNL. A proximité du fond, l'influence du profil bathymétrique est davantage marquée sur la turbidité que sur la température. En effet, si l'individualisation d'une couche thermique ou turbiditique moultant la topographie lacustre peut être comparable, le gradient d'atténuation thermique est moins affecté par la profondeur du site que le gradient turbidimétrique; ce dernier est nettement plus fort dans les zones profondes (Fig. 83: A - B).

En août, la BNL s'estompe et la PNL se confine au-delà de 60 m de profondeur (Fig. 82: C). Elle génère ainsi une couche claire plus importante, malgré l'enfoncement du métalimnium. A la fin septembre, la PNL en tant que telle

disparaît tandis qu'une BNL significative a été réinstaurée (Fig. 82: D).

* Comme l'enfoncement de la CWL s'est poursuivie assez régulièrement depuis son identification du début juillet et comme la BNL estivale disparaît totalement vers la fin août, il apparaît judicieux d'expliquer la genèse de la BNL automnale par l'arrivée de la PNL à proximité du fond. Selon la vitesse de 1 m/jour déterminée précédemment, la base de la CWL devrait s'enfoncer de 76 m du 4 juillet au 18 septembre. Or cette distance correspond exactement aux 80 m observés entre 30 et 110 m sur les profils turbiditiques. A cette époque, il paraît donc plus rigoureux de parler de l'arrivée au fond de la PNL que d'une véritable BNL conforme à sa définition estivale.

Durant le mois d'octobre, l'épaisseur de la couche turbide épilimnique s'amplifie conjointement à l'enfoncement de la thermocline (Fig. 12). Elle vient absorber le niveau dévolu au métalimnium (Fig. 73) dont la caractérisation particulière devient hasardeuse. La couche claire sous-jacente retrouve sa signification printanière où elle définit la prépondérance de la masse aquatique profonde. A proximité du fond, une légère BNL résiduelle subsiste avec une structure inhabituelle en "feuillette" (Fig. 73 A - 74). Une telle configuration structurale, déjà ébauchée au début du mois, constitue la prolongation en profondeur de son développement maximal observé entre 15 et 45 m (Fig. 74).

* L'élaboration de cette structure à la veille des brassages automnaux demeure obscure. Toutefois, selon des études récentes opérées sur la bordure septentrionale de la Méditerranée (Aloisi, 1986), il a été suggéré qu'une alimentation verticale pouvait nourrir des couches turbides intermédiaires comprises entre le panache superficiel et la couche benthique néphéloïdale. Une partie des suspensions organo-minérales issues de la couche dense de surface serait alors provisoirement bloquée au niveau d'un gradient de viscosité (Cauwet, 1985, in: Aloisi, 1986). Les fluctuations bathymétriques d'immersion de ce gradient, de faible amplitude, consécutives à l'alternance fréquente de deux régimes météorologiques dominants, expliqueraient alors l'existence de plusieurs couches turbides secondaires (Aloisi, 1986). Des mesures personnelles réalisées en Méditerranée, à proximité de l'embouchure du Rhône, avec l'appareillage employé sur le lac de Neuchâtel ont confirmé l'existence de ces structures intermédiaires (Fig. 84: A). Malgré les énormes différences qui caractérisent le delta du Rhône d'un milieu lacustre, il ne nous semble pas inopportun de songer à l'idée d'une évolution graduelle du gradient de viscosité pour expliquer la formation automnale des couches néphéloïdes intermédiaires du lac de Neuchâtel. Des analyses ultérieures sur la composition des particules de ces niveaux denses seraient alors nécessaires.

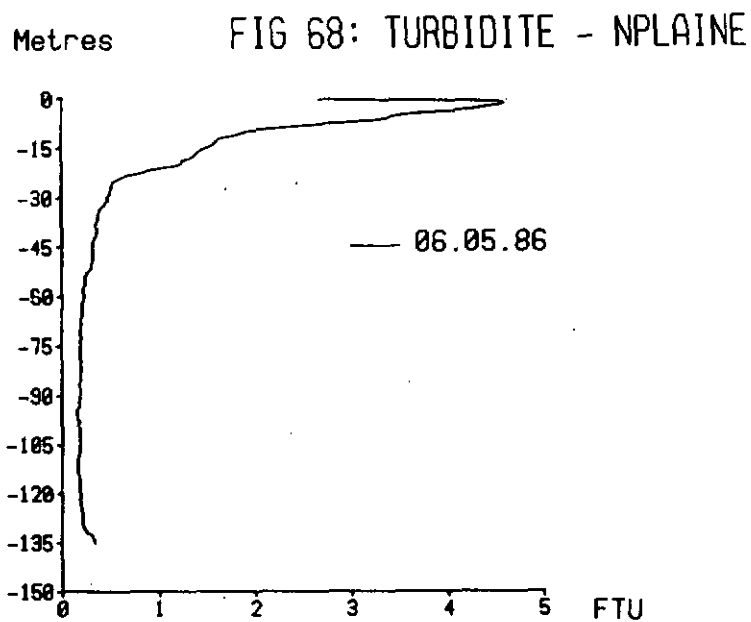


FIG. 68: Profil turbiditique typique lors de la prolifération phytoplanctonique printanière.

FIG 69 A: TURBIDITE - NNPLAINE

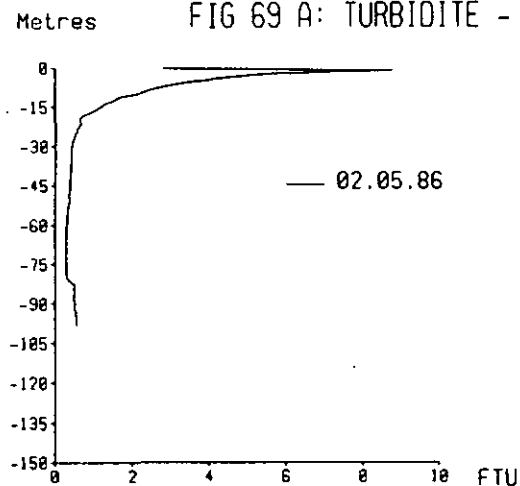


FIG 69 B: TURBIDITE - NPLAINE

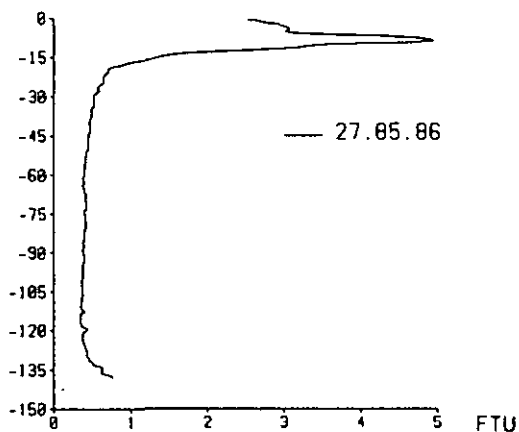
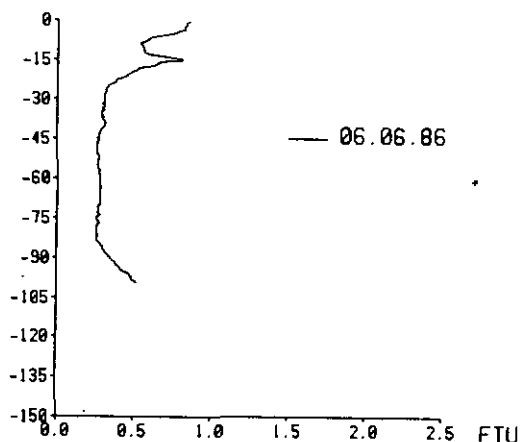


FIG. 69:A-B: Intense extension de la turbidité épilimnique (A-0) et présence exceptionnelle d'une légère 0NL printanière (A).

Metres FIG 70 A: TURBIDITE - NNPLAINE



Metres FIG 70 B: TURBIDITE - NNPLAINE

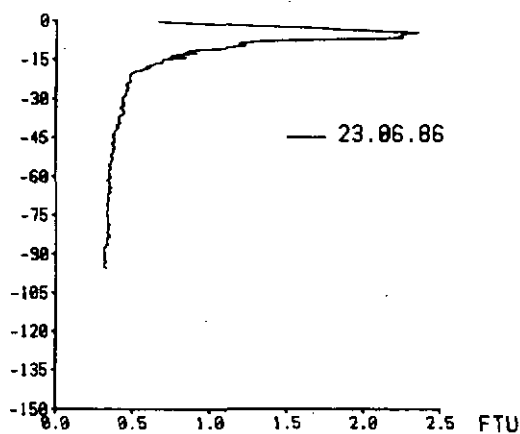
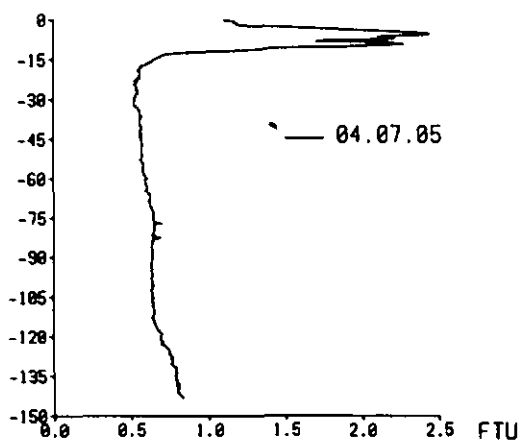
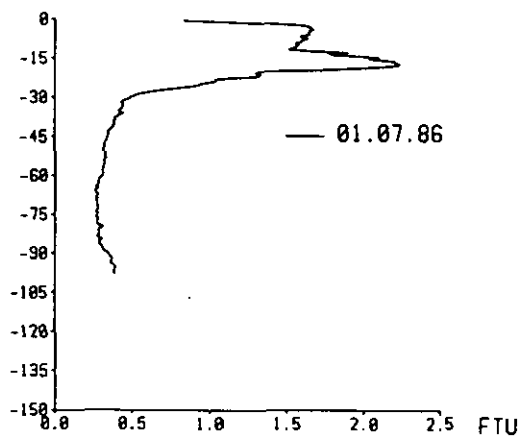


FIG. 70:A-B: Profil turbiditique succédant à un épisode de détérioration météorologique (A) et après le rétablissement des conditions estivales normales (B).

Metres FIG 71 A: TURBIDITE - BEVAIX



Metres FIG 71 B: TURBIDITE - NNPLAINE



Metres FIG 71 C: TURBIDITE - AREUSE

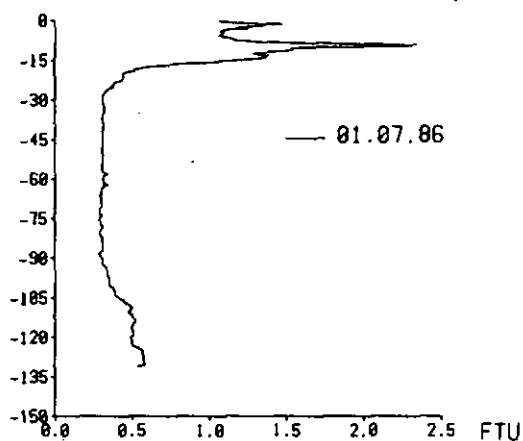


FIG. 71:A-B-C: Développement de multiples pics de turbidité dans l'épilimnium en juillet.

Metres FIG 72: TURBIDITE - SPLAINE

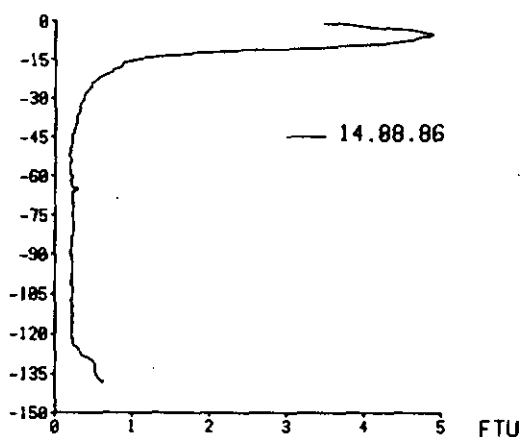
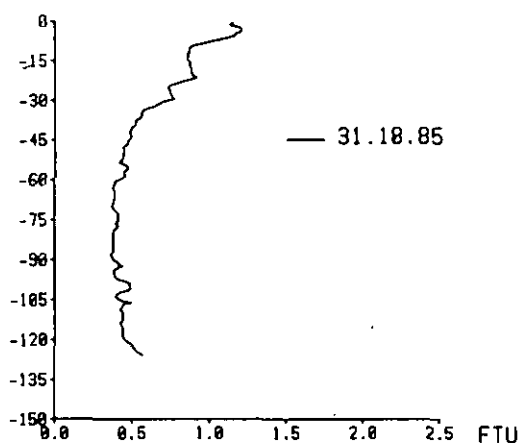


FIG. 72: Profil turbiditique typique d'une période estivale déjà fort éloignée de l'établissement de la stratification thermique.

Metres FIG 73 A: TURBIDITE - NPLAINE



Metres FIG 73 B: TURBIDITE - NNPLAINE

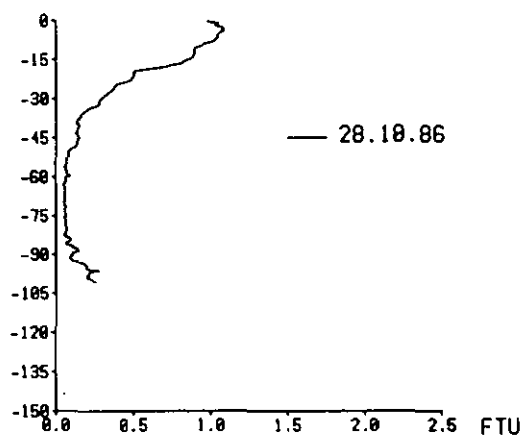


FIG. 73:A-B: Forte extension épilimnique sur des profils turbiditiques automnaux.

Metres FIG 74: TURBIDITE - SERR

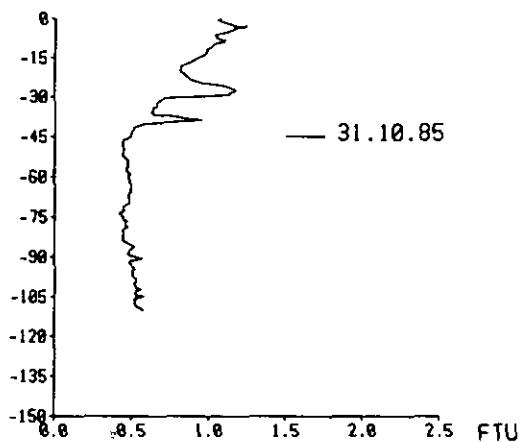


FIG. 74: Structures "feuilletées" sur un profil turbiditique tardi-automnal.

Metres FIG 75: TURBIDITE - 02.05.86

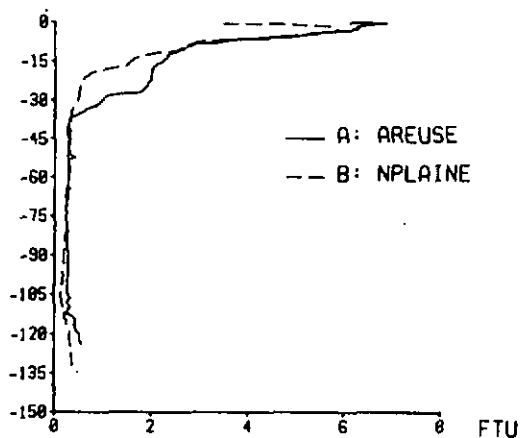


FIG. 75: Influence des charges de l'Areuse entre 15 et 30 m (Profil A) comparée à un profil typiquement lacustre (B).

Metres FIG 76: TURBIDITE - MENTUE

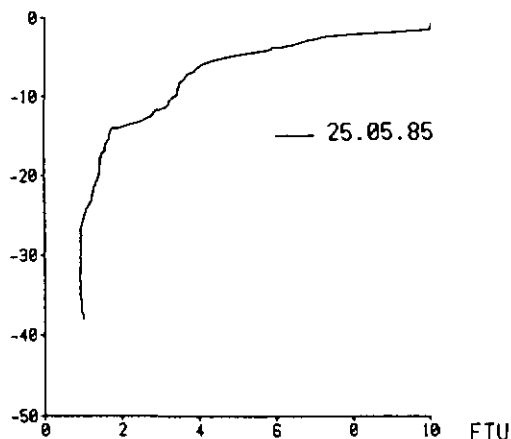


FIG. 76: Influence des charges de la Mentue entre 8 et 14 m sur un profil printanier d'embouchure.

Metres FIG 77: TURBIDITE - 25.07.86

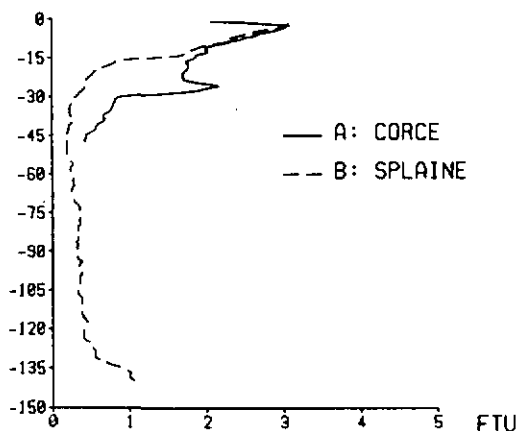


FIG. 77: Perturbations dans un profil turbiditique du haut-lac (A) comparé à un profil typiquement lacustre (B).

Metres FIG 78: TURBIDITE - GLETT

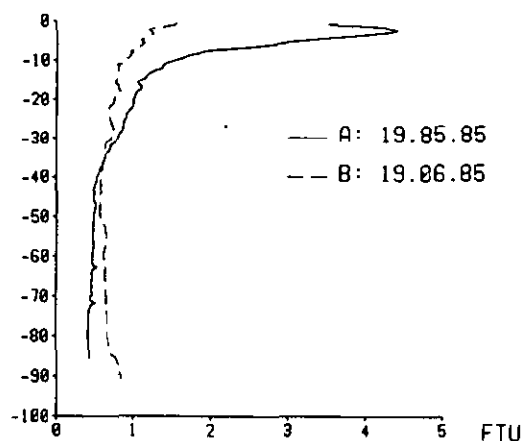


FIG. 78: Profils turbiditiques printaniers avec CWL hypolimnique généralisée (A) et après l'établissement de la PNL (B).

Metres FIG 79: TURBIDITE - SPLAINE

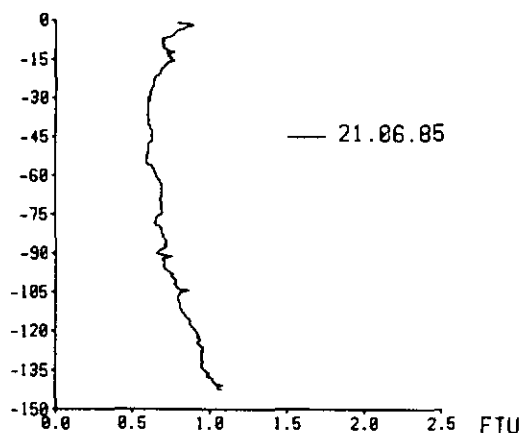


FIG. 79: Disparition des troubles épilimniques après des perturbations météorologiques, établissement de la BNL.

FIG 80: NPLAINE - 11.07.85

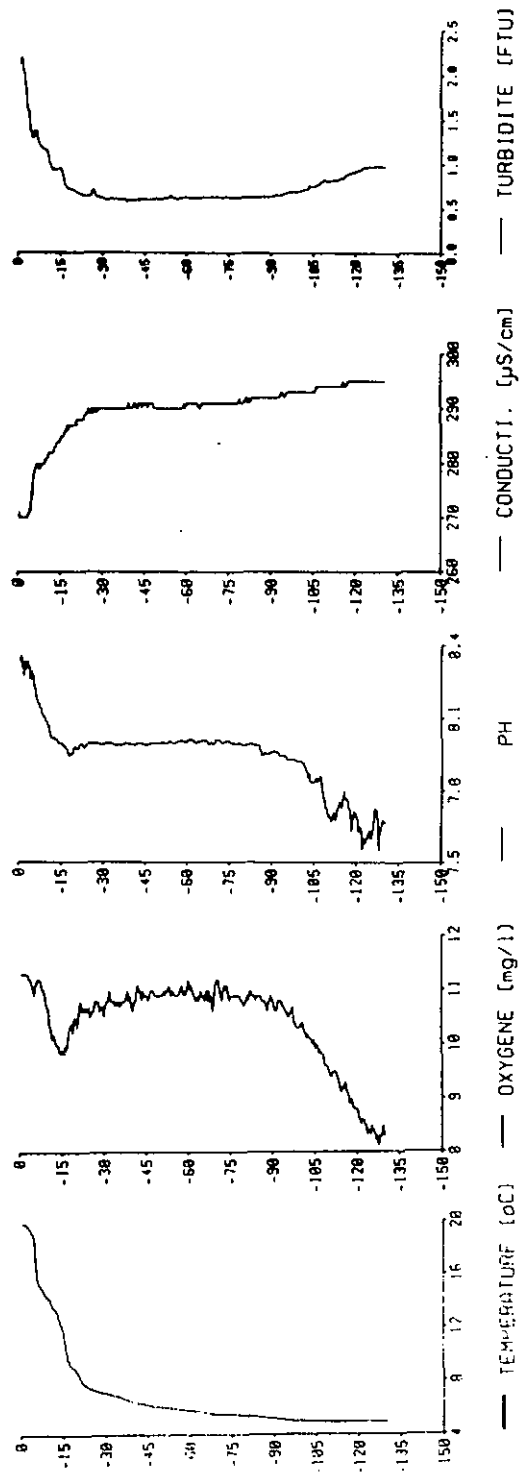


FIG. 80: Connivances entre les structures
turbiditiques et l'évolution physico-chimique
verticale, spécialement à proximité du fond
avec l'établissement de la BNL.

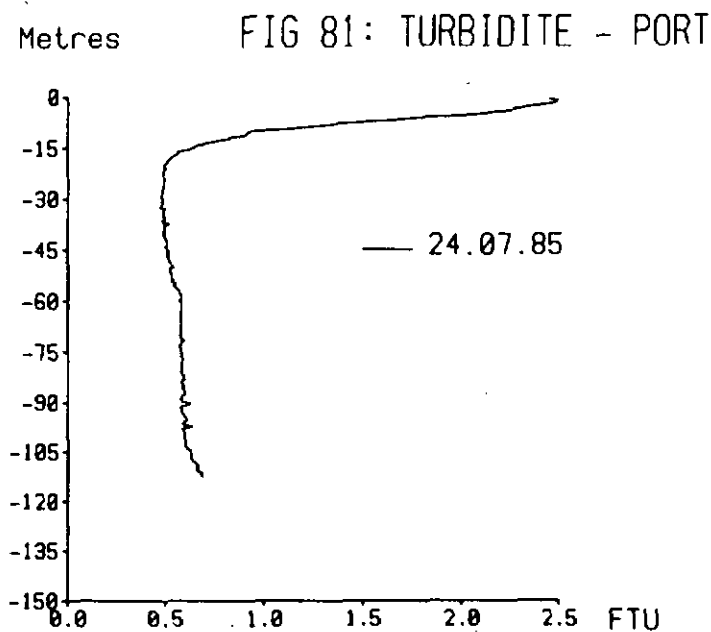


FIG. 81: Profil turbiditique estival avec intensification de la CWL (15 à 50 m), enfoncement de la PNL (50 à 100 m) et réduction de la BNL (100 à 110 m).

FIG 82 A: TURBIDITE - NPLAINE

Metres

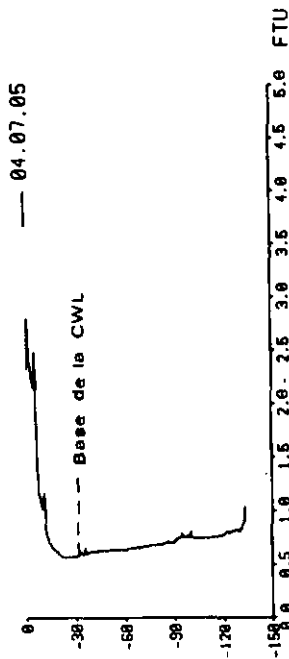


FIG 82 C: TURBIDITE - NPLAINE

Metres

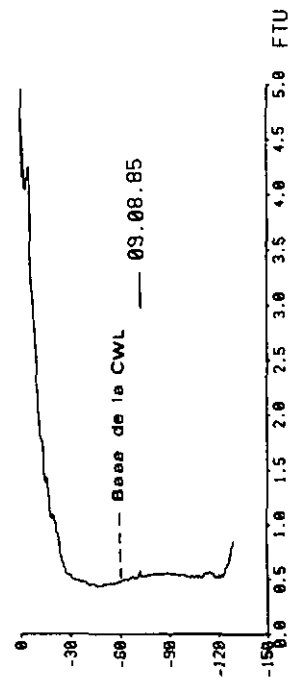


FIG 82 B: TURBIDITE - NPLAINE

Metres

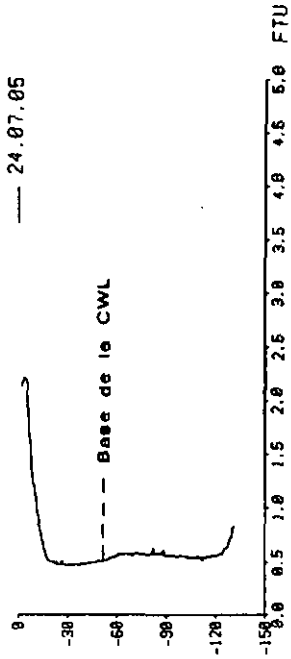


FIG 82 D: TURBIDITE - NPLAINE

Metres

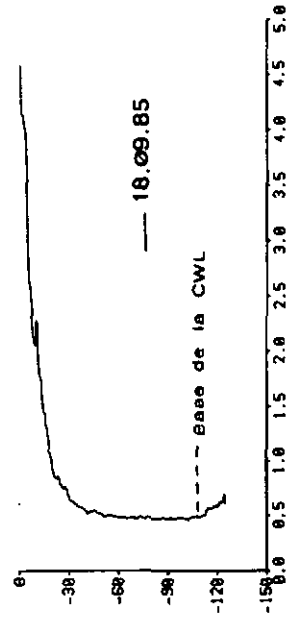


FIG. 82: Amplification estivale de la CWL qui repousse la PNL caractérisée par une charge particulaire plus prononcée; la vitesse de cet enfouissement "stérigraphique" peut être assimilée à la vitesse de chute des particules qui sédimentent pendant cette période.

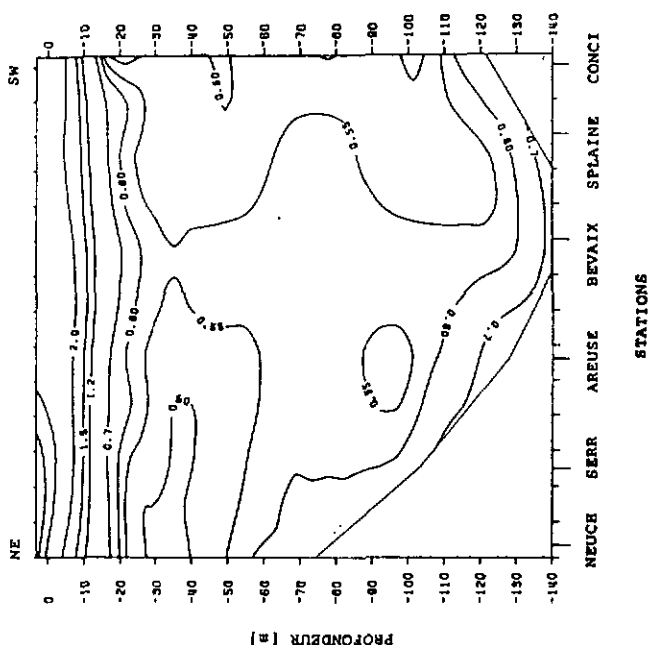


FIG. 83 B: Evolution turbiditique verticale dans une coupe longitudinale de la rive NW du lac, le 25 juillet 1985 (Echelle horizontale: 1 cm = 1.61 km).

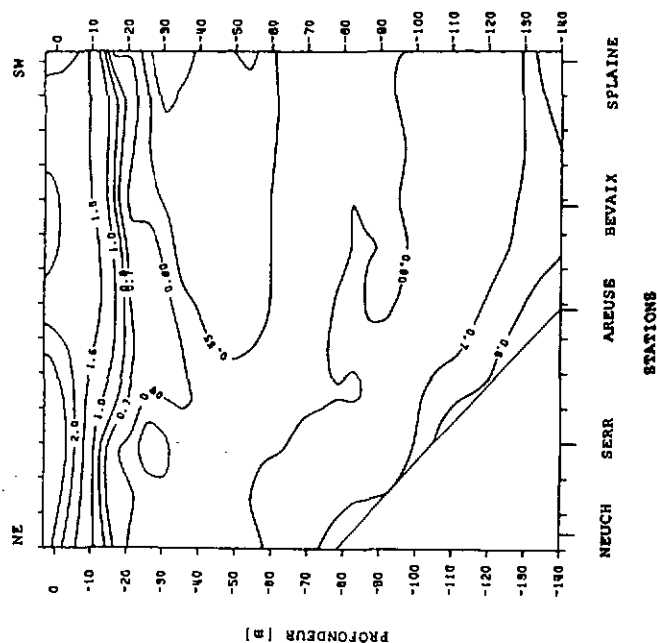


FIG. 83 A: Lignes d'iso-turbidité dans une coupe verticale du lac, le long de la vallée NW, le 4 juillet 1985 (Echelle horizontale: 1 cm = 1.23 km).

Metres FIG 84 A: TURBIDITE - STATION 5

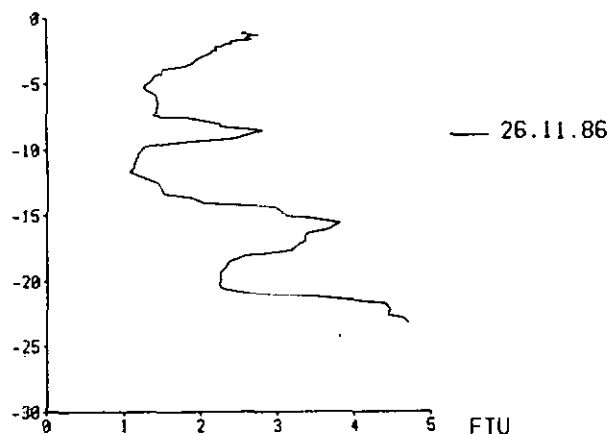


FIG. 84 A: Profil turbiditique à l'embouchure méditerranéenne du Rhône; il présente des couches néphéloïdes intermédiaires entre le panache superficiel et la BNL.

Metres FIG 84 B: TURBIDITE - MORAT

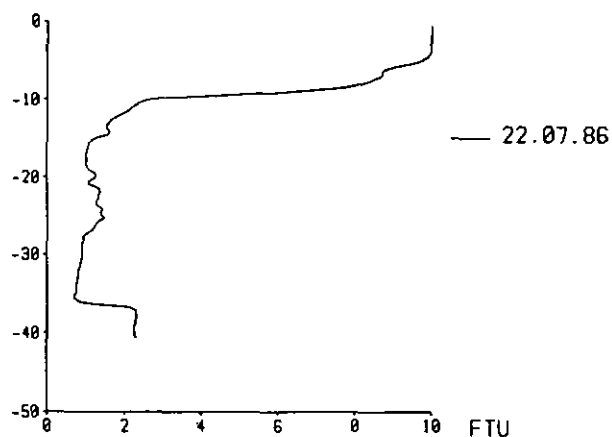


FIG. 84 B: Profil turbiditique estival du lac de Morat.

III.5 CONCLUSION

L'observation de l'évolution turbide saisonnière d'une station (Fig. 85) permet de résumer la comportement biologique, chimique et dynamique des particules en suspension dans le lac de Neuchâtel. Les phénomènes épi-limniques sont liés à la température qui, selon les réserves nutritives, conditionne la productivité phytoplanctonique. Il s'y produit alors une grande activité photosynthétique, productrice d'oxygène, consommatrice de CO₂, responsable d'une élévation du PH et d'une diminution de la conductibilité de l'eau (Fig. 58). L'accentuation estivale de ces nouvelles conditions deviennent propices à la précipitation des carbonates de calcium (Portner, 1951). L'alternance des proliférations algaires et zooplanctoniques et la minéralisation géochimique des microcalcites régissent donc ensemble le système particulaire de surface. L'enfoncement estival des courbes d'isoturbidité (Fig. 85) illustre l'amplification de l'épilimnium, qu'il soit défini par ses caractéristiques thermiques (Fig. 11 - 12) ou particulières (Fig. 67 - 82).

Durant l'année, l'épilimnium est marqué par deux pics de haute concentration particulaire qui correspondent approximativement à des maxima thermiques (Fig. 86). Lors de sa première intensification, la turbidité est accompagnée par une grande concentration d'oxygène dissous, un PH élevé et une faible conductibilité. L'ensemble de ces caractéristiques est indubitablement conditionné par le développement d'une population phytoplanctonique. Au contraire, la deuxième période de haute turbidité est soutenue par un PH et une concentration d'oxygène relativement bas mais également par une faible conductibilité de l'eau. Son origine pourrait alors être tributaire de la combinaison complexe de processus biologiques (développements planctoniques) et géochimiques (précipitation carbonatée).

Légèrement au-dessous de la thermocline, un niveau appauvri en oxygène apparaît en juillet (Fig. 80) et s'individualise ensuite jusqu'en automne (Fig. 87). L'apparition simultanée d'une désalcalinisation du PH causée par un enrichissement du CO₂ (Portner, 1951) conduit à lier ce niveau aux processus de dégradation initiale des particules organiques. Cette couche, métalimnique au sens thermique, correspond à l'élaboration de la CWL définie dans le schéma structural du profil turbiditique vertical (Fig. 67).

La majorité de la couche hypolimnique, à l'exception de la BNL, constitue une masse aquatique propre. Encore claire au début du printemps (Fig. 85), elle subit ensuite le transit de la décantation des particules générées en surface (Fig. 82). Cette intensification particulaire définit une couche néphéloïde pélagique (PNL) comprise entre la CWL et la BNL (Fig. 67). En juin, elle peut englober toute la colonne comprise entre l'épilimnium et la BNL. Puis, après l'apparition et l'amplification de la CWL, elle s'enfonce lentement dans les couches profondes (Fig. 82). Cet effacement progressif permet d'estimer une vitesse moyenne de sédimentation estivale des particules qui s'approchait de 1 m/jour.

Les variations d'intensité et d'épaisseur de la couche benthique néphéloïde (BNL) sont locales, saisonnières et dépendent de la profondeur de la station. Ces nombreuses fluctuations tendraient à priori à la lier essentiellement à des phénomènes météorologiques capables de produire une remise en suspension des particules sédimentées par le retour en profondeur de l'onde de surface soumise aux tempêtes. Il apparaît toutefois qu'une magnifique BNL se développe en juillet (Fig. 71) alors que la stratification thermique est bien établie et que les activités dynamiques de surface sont plutôt ténues. De même, à cette époque, des conditions météorologiques semblables règnent sur le lac de Morat et la structure turbiditique de sa colonne aquatique présente des caractéristiques identiques. Le développement de la BNL y est même encore plus spectaculaire (Fig. 84: B).

Il faut également noter qu'il y a une excellente corrélation entre le déploiement maximal de la BNL (Fig. 83: A - B) et l'individualisation thermique (Fig. 17), alcalimétrique et oxygénique (Fig. 33) de la couche benthique qui épouse la morphologie du lac (Fig. 80).

Dans l'état actuel de nos recherches, il est seulement possible d'émettre des suggestions sur la nature de la composition de cet enrichissement particulaire benthique:

- L'explication fournie par Chambers et Eadie (1981) pour le lac Michigan consistait à relier l'élaboration d'une BNL estivale, postérieurement à l'établissement de la stratification thermique, à des phénomènes dynamiques créés par des variations locales de température. Cette interprétation nous paraît difficile à transposer dans les dimensions du lac de Neuchâtel.

- De même, le dégagement de gaz (Méthane ?) à partir du sédiment, pouvant libérer des bulles qui produiraient une caractérisation identique à celle d'une charge particulaire sur l'appareil de mesures, reste plausible mais sans confirmation.

- Finalement, l'explication qui nous paraît la plus plausible est à rechercher dans l'existence suspectée d'une activité microbiologique ou bactériologique susceptible d'intensifier la turbidité des couches benthiques; la preuve formelle d'une telle origine doit cependant encore être apportée.

En automne, la BNL serait constituée par les reliques particulières qui définissaient la PELAGIC NEPHELOID LAYER (PNL) estivale.

La charge particulaire qui compose la BNL constitue un enrichissement hypolimnique qui peut être calculé. Selon Biscaye et Eitrem (1977), Nyffeler et Godet (1986), le "NET CROP" (zone hachurée, Fig. 67) correspond à l'excès particulaire de la couche benthique par rapport au CWM. Il est représenté par l'intégrale de la concentration des matières en resuspension par unité de surface sédimentaire, selon la formule:

$$\text{NET CROP} = \int_{\text{Fond}}^{\text{Amin}} F \cdot [C(\text{max}) - C(\text{cwm})] dx$$

Amin = Hauteur de la BNL

F = Facteur de transformation de la concentration-FTU
en concentration-mg/l
= 1.7

C(max) = Concentration maximale à proximité du fond

C(cwm) = Concentration du CLEAR WATER MINIMUM

La détermination quantitative du NET CROP n'est pas toujours très aisée, l'intensité de la PNL pouvant parfois astomper le CLEAR WATER MINIMUM. Il est toutefois possible et intéressant de fournir quelques approximations sur la surcharge particulaire en suspension dans les couches profondes:

Au cours de la campagne du 4 juillet 1985 qui présente une BNL généralisée, la moyenne du NET CROP de 12 stations vaut 2.8 g/m². Le 25 juillet, elle s'abaisse à 2.1 g/m², le NET CROP présentant ici une excellente corrélation avec la profondeur de la station. La surcharge totale ainsi répartie dans la BNL (NET CROP) qui recouvre toute la surface morphologique du lac qui se trouve au-delà d'une trentaine de mètres de profondeur (environ 140 km²; selon Sollberger, 1974) présenterait alors un stock particulaire de 390 tonnes et respectivement de 300 tonnes.

La moyenne annuelle (mai à octobre) de 2 stations profondes (NPLAINE et AREUSE) s'approche de 2.7 g/m². La courbe d'évolution présente un minimum en mai et en octobre (0.3 g/m²), un maximum en juillet (jusqu'à 7 g/m²) et une légère recrudescence en septembre, soit durant les deux principales périodes de production planctonique éphémère.

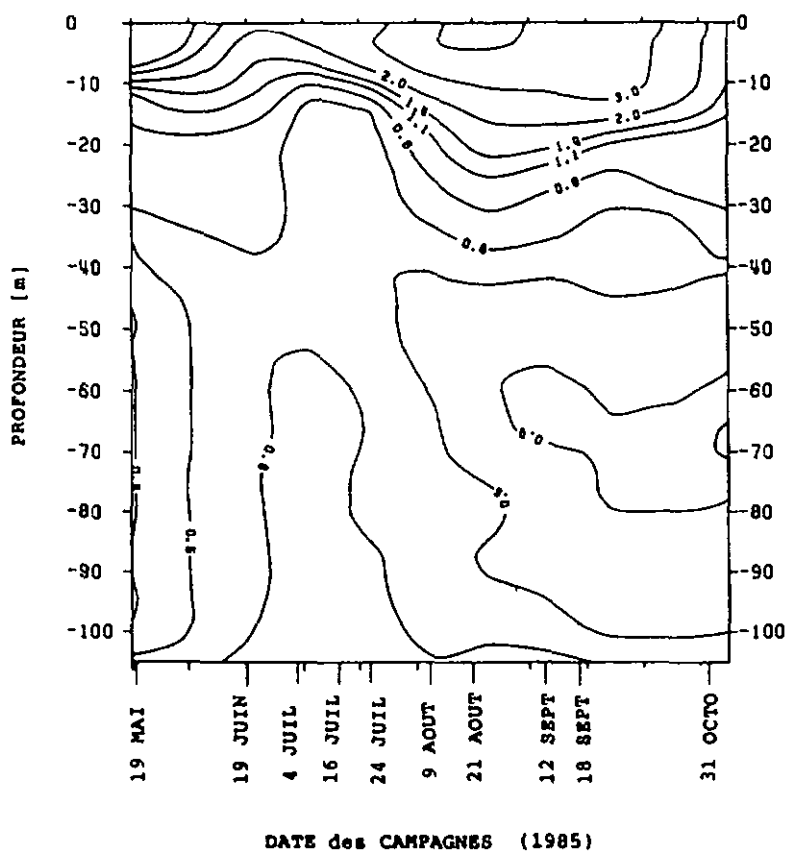


FIG. 85: Evolution verticale de la turbidité au cours de l'année 1985 sur la station SERR.

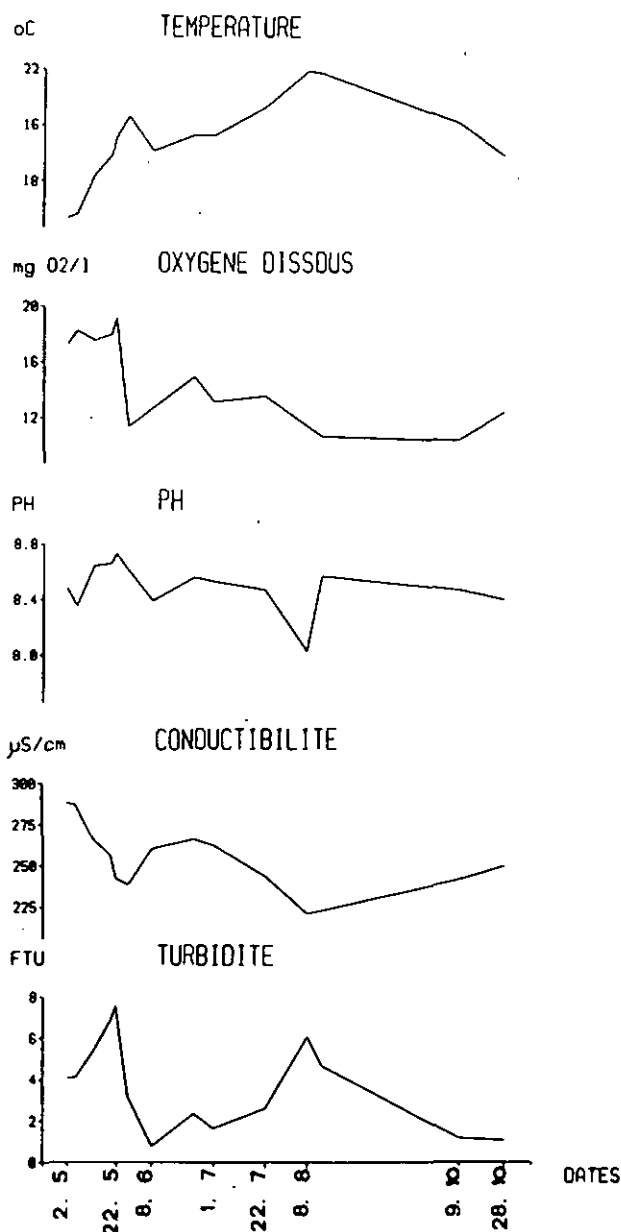


FIG. 86: Evolution saisonnière de la physico-chimie et de la turbidimétrie du lac selon les observations de la station NNPLAINE à 5 m de la surface en 1986.

FIG 87: NNPLAINE - 09.10.86

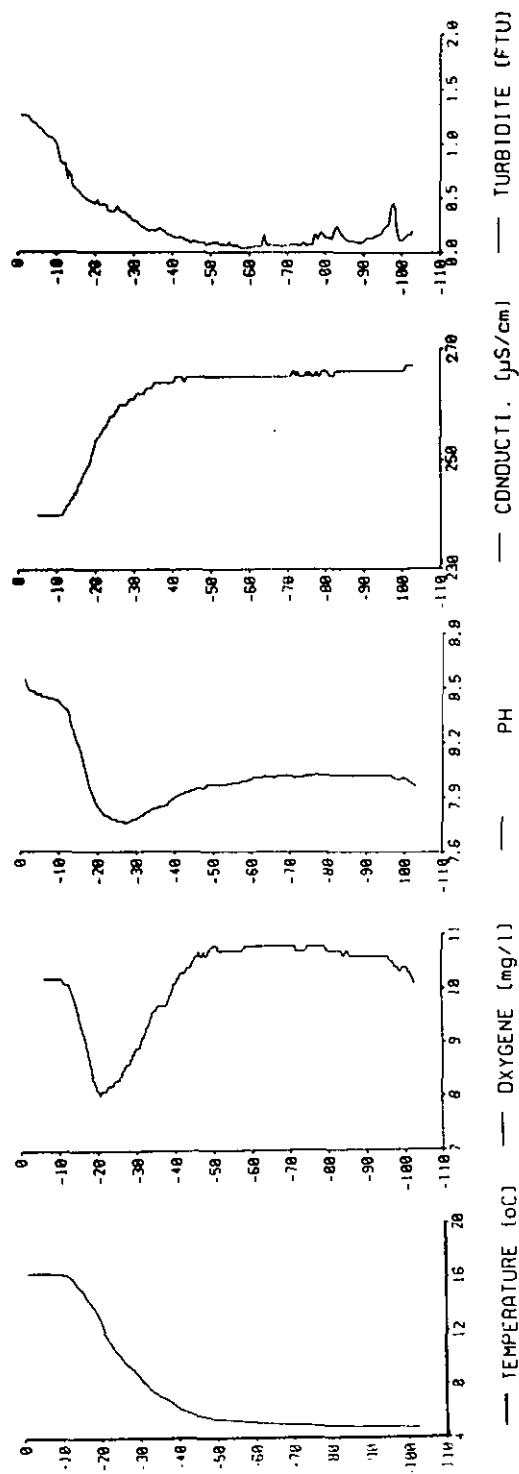


FIG. 87: Relations directes entre l'épaisseur de l'épilmnium thermique et turbiditique, l'intensité de la consommation métallimnique d'oxygène, l'abaissement du PH et la brusque variation de la conductibilité.

IV DYNAMIQUE DES PARTICULES EN SUSPENSION

IV.1. Méthodologie

La dynamique verticale des particules en suspension ne peut être abordée par leur récolte ponctuelle et instantanée avec une bouteille océanographique "Niskin". Elle nécessite un échantillonnage intégré sur une certaine période pour recueillir l'ensemble des particules en décantation dans une colonne d'eau (Sturm, 1985). L'évolution des techniques adoptées dans ce domaine a permis d'aboutir à une méthode de prélèvement pas trop perturbatrice du milieu ambiant. Il s'agit de collecteurs de sédiments placés in situ qui réceptionnent les matières solides en sédimentation dans diverses couches limnologiques.

Le collecteur de sédiments:

Contrairement aux appareils développés par nos précurseurs (Sollberger, 1974), la vitesse et le taux de sédimentation ne sont plus abordés par un échantillonnage particulaire à l'interface sédimentaire sur un récipient plat de grande surface. Les pièges actuels sont placés à différentes profondeurs dans la colonne d'eau. Ils sont suspendus à une corde verticale, légèrement encreée, maintenue à une bouée supérieure qui reste à 20 m de la surface pour éviter les fortes intensités dynamiques des vagues. L'ensemble du dispositif est rattaché à un système lourd fortement ancré, maintenu en surface par une grande bouée (Fig. 88). Lors du relevé des collecteurs, seul le dispositif léger est remonté et émergé.

Les pièges eux-mêmes doivent présenter un rapport supérieur à 7 entre leur hauteur et leur diamètre pour éviter tout éventuel mouvement de turbulence sur les particules déposées au fond du récipient (Sturm, comm. pers.). L'ensemble élaboré à Neuchâtel comprend 6 cylindres de 100 cm de hauteur pour un diamètre de 10 cm. Ils ont été placés, par groupes de deux, à la base de l'épilimnium (30 m), dans l'hypolimnium (60 m) et à 5 m du fond (Fig. 88). L'immersion a eu lieu par 100 m de fond, dans la plaine neuchâteloise (Fig. 10), le 25 avril 1986. La première période d'exposition a duré 26 jours, soit jusqu'au 20 mai. Une deuxième période de 9 jours a dû être interrompue avant le 1er juin à cause de l'activité des pêcheurs professionnels. Une dernière période d'exposition de 25 jours s'est déroulée au même endroit en octobre 1986.

Le dispositif artisanal employé a été élaboré selon le modèle utilisé par l'EAWAG sur le lac des Quatre-Cantons (Sturm, comm. pers.). Il s'agit d'un collecteur de sédiments "cumulés", c'est-à-dire qu'il intègre l'ensemble des particules récoltées durant toute la période d'exposition. Les collecteurs à intervalles, plus performants, auraient nécessité des moyens financiers beaucoup plus considérables. Ils sont constitués par un grand cylindre (30 à 40 cm de diamètre) qui présente une base en "entonnoir" capable de concentrer les dépôts dans une série de godets. Ceux-ci sont placés sur un carrousel et ils se présentent à la base du cylindre selon un horaire

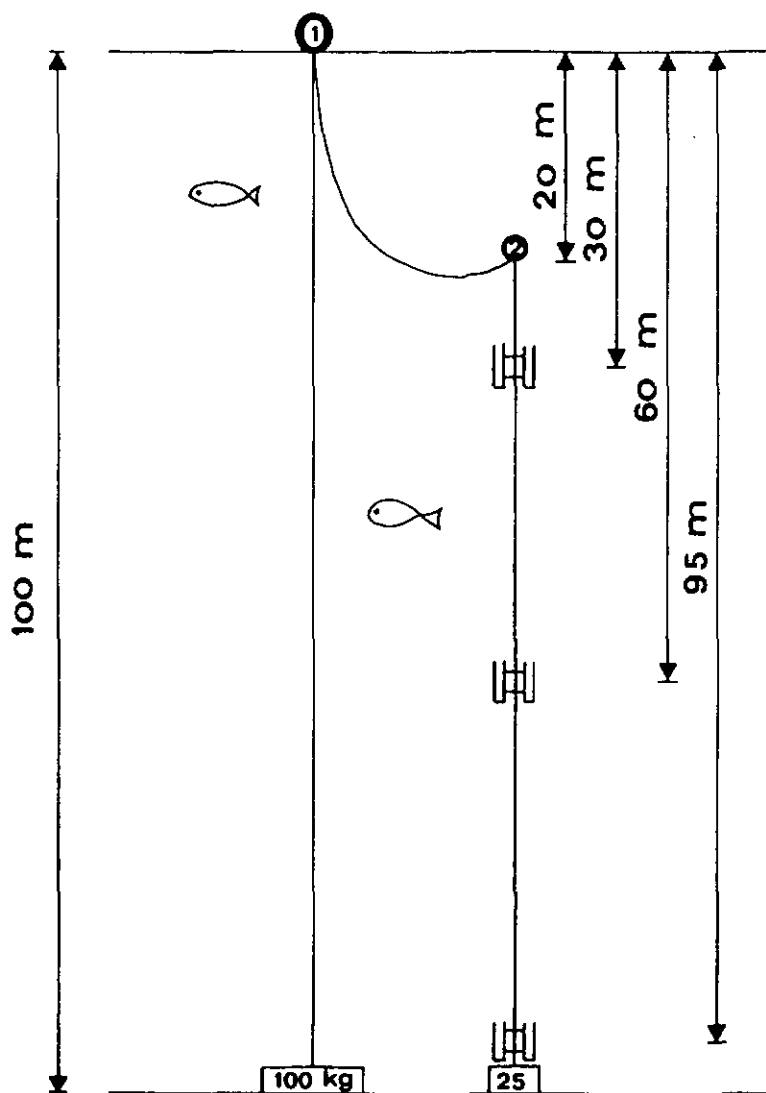


FIG. 88: Représentation schématique du collecteur de sédiment utilisé sur le lac de Neuchâtel.

programmé (Rathke et al., 1981; Sturm et al., 1982). Ils ont l'avantage d'enregistrer des épisodes très brefs qui s'effaceraient sur une longue durée et d'éviter les fortes concentrations. De plus, il est possible d'y ajouter, avant l'immersion, une solution stabilisatrice capable d'interrompre toute activité microbiologique postérieurement au dépôt dans le collecteur.

IV.2. Détermination du flux particulaire et du taux de sédimentation

Lors des 3 périodes d'exposition, les suspensions accumulées dans un des deux collecteurs de chaque niveau sont récupérées pour la détermination du flux particulaire. Leur prélèvement avec l'eau surnageante représente un volume approximatif de 2 litres. Cette suspension est immédiatement filtrée sur des membranes de $0.45 \mu\text{m}$ de porosité préalablement pesées. Après le séchage des filtres à 60°C , la différence de poids indique la masse particulaire sèche [Ms] récoltée sur la surface d'un collecteur [Sc] durant la période d'échantillonnage [N = nombre de jours], à une profondeur donnée. Elle permet de calculer le flux particulaire [F], selon la formule:

$$F = \frac{Ms}{N \cdot Sc} \quad [\text{g/m}^2 \cdot \text{jour}]$$

Une certaine appréciation du taux de sédimentation peut également être abordée à partir de la détermination de la masse particulaire récoltée dans un collecteur:

- Soit M[F] la masse du flux particulaire qui serait prélevée quotidiennement à une certaine profondeur sur une surface de 1 m^2 .
- Soit d la densité moyenne des suspensions sèches, proche de 2.7 g/cm^3 .

L'ensemble des particules sédimentées par jour et par m^2 va représenter un volume (V_0):

$$V_0 = \frac{M[F]}{d} \quad [\text{cm}^3]$$

Si l'on accepte une porosité de 75 % dans les dépôts, les particules vont constituer un volume réel (V):

$$V = 4 \cdot V_0 = 4 \cdot \frac{M[F]}{d} \quad [\text{cm}^3]$$

Ce volume sédimentaire, réparti sur une surface [S] de 1 m^2 , va déterminer un taux de sédimentation journalière (T):

$$T = \frac{V}{S} = 4 \cdot \frac{M[F]}{S \cdot d} \quad [\text{cm}]$$

Le taux de sédimentation annuelle théorique (T_a), calculé par extrapolation d'une moyenne journalière établie durant les 3 périodes d'exposition des collecteurs, vaudrait alors:

$$T_a = 365 \cdot T \text{ [cm]}$$

ou:

$$T_a = 365 \cdot \frac{4 \cdot M[F]}{S \cdot d}$$

$$\text{si } S = 1 \text{ m}^2$$

$$d = 2.7 \text{ g/cm}^3$$

$$T_a[\text{cm}] = 5.41 \cdot 10^{-2} \cdot M[F]$$

Discussion:

Quelle que soit son approche, la détermination des paramètres dynamiques de la sédimentation est sujette à de nombreuses approximations. Dans le cas du collecteur de sédiments, la première perturbation est causée par son introduction dans le milieu et les troubles dynamiques qu'il peut provoquer sur la libre circulation des particules. Ce paramètre est difficilement appréciable mais il paraît être assez restreint. En second lieu, il est apparu maintes fois (Rathke et al., 1981; Sturm, 1985) que les dépôts accumulés pendant une longue durée dans un même collecteur pouvait subir de fortes atteintes microbiologiques et géochimiques. L'ensemble de ces réactions peut alors influencer la masse particulaire récoltée. Toutefois, selon Sturm (1985), les perturbations les plus graves se répartissent à des situations spatio-temporelles bien précises. Tout d'abord, elles peuvent réduire la quantité de matériel capté par dégradation microbienne et broutage dans les collecteurs installés dans l'épilimnium en période estivale. Ensuite, elles peuvent augmenter le flux particulaire hypolimnique par recyclages biochimiques des sédiments remis en suspension par l'instauration de conditions anoxiques à proximité du fond. Il s'avère que les périodes d'exposition des collecteurs placés dans le lac de Neuchâtel s'écartent notablement de telles conditions. Elles nous permettent donc d'accepter avec une certaine confiance les déterminations du flux particulaire mesurées durant les mois d'avril, mai et octobre.

Un problème supplémentaire surgit dans l'appréciation du taux de sédimentation. Alors que sa détermination sur des carottes de sédiments indique la quantité finale de particules déposées sur le fond, son calcul basé sur les résultats acquis par les collecteurs est influencé par les approximations fournies à la densité et à la porosité et par tous les processus de resuspensions benthiques éventuelles. Finalement, il faudra tenir compte du fait très important que le taux de sédimentation annuel théorique calculé est extrapolé à partir de mesures réalisées aux mois d'avril, mai et octobre, soit à des périodes bien précises de productivité planctonique et de précipitation minéralogique dans le cycle limnologique. Nous verrons qu'elles peuvent tout de même bien s'accorder avec des résultats obtenus sur des carottes sédimentaires.

IV.3. Le flux particulaire dans le lac de Neuchâtel

Le flux particulaire total, déterminé par collecteurs de sédiments, a été calculé durant 2 périodes printanières et une période automnale à 3 niveaux aquatiques (Tableau 5). Durant la première période qui s'étend du 25 avril au 20 mai 1986, la masse particulaire échantillonnée est similaire sur les 3 niveaux, soit à 30, 60 et 95 m de profondeur. Elle induit un flux total moyen de $6.76 \text{ g/m}^2 \cdot \text{jour}$. Du 20 au 29 mai, les particules récoltées à la base de l'épilimnium (-30 m) sont légèrement inférieures à celles des collecteurs hypolimniques; elles ont peut-être pu subir une première altération microbiologique. A 60 et 95 m de profondeur, le flux pratiquement identique s'élève à une moyenne de $8.2 \text{ g/m}^2 \cdot \text{jour}$.

En automne, du 3 au 28 octobre, le flux est comparable à -30 et -60 m; il est toutefois nettement plus important qu'en mai. A 5 m du fond, une concentration exceptionnellement dense a été piégée dans le collecteur; elle conduirait à un flux proche de $270 \text{ g/m}^2 \cdot \text{jour}$ mais il est fort possible qu'il y ait eu momentanément un intense courant latéral susceptible d'accentuer considérablement le flux que nous attribuons unilatéralement à des mouvements verticaux.

TABLEAU 5: Flux particulaire mesuré lors des diverses périodes d'exposition des pièges ($\text{g/m}^2 \cdot \text{jour}$).

	25.04.86	20.05.86	03.10.86
	20.05.86	29.05.86	28.10.86
30 m	6.76	6.30	14.0
60 m	6.76	8.04	13.2
95 m	6.80	8.45	270.0

Discussion:

Si l'on tente d'établir une moyenne sur toutes les observations printanières, le flux particulaire total atteindrait alors environ $7.0 \text{ g/m}^2 \cdot \text{jour}$. Cette valeur est tout à fait conforme et comparable à celle des autres lacs suisses (Sturm, 1985). Toutefois, pour obtenir une moyenne annuelle, il faudrait la moduler par l'ensemble des phénomènes d'un cycle limnologique complet. Si l'on admet que 70 % des suspensoides sédimentent en 5 mois entre mai et septembre (Sturm, 1985) avec ce flux de $7.0 \text{ g/m}^2 \cdot \text{jour}$, les 30 % restants sédimenteraient en 7 mois avec un flux de $2.2 \text{ g/m}^2 \cdot \text{jour}$. Le lac de Neuchâtel subirait alors approximativement un flux total annuel moyen de $4.2 \text{ g/m}^2 \cdot \text{jour}$.

Ce flux pourrait être légèrement augmenté par les brefs épisodes d'apports allochtones ou de remaniements locaux de hautes concentrations particulaires. Nous interprétons ainsi les observations d'octobre caractérisées par une

surcharge considérable à 5 m du fond et des élévations significatives de la concentration dans la colonne aquatique. Il ne nous est toutefois pas possible de démontrer la brièveté de l'évènement supposé car l'échantillonnage a été accumulé sur l'ensemble de la période d'exposition. Généralement, de tels évènements ont une répercussion très courte qui ne dépasse guère 2,5 jours (Sturm, 1985). Les profils turbidimétriques réalisés durant la période d'exposition ne révèlent aucune surcharge particulière. Les processus qui auraient déterminé ces apports considérables se seraient donc certainement produits entre les campagnes de sondage, confirmant ainsi la brièveté de leur manifestation.

IV.4. Le taux de sédimentation dans le lac de Neuchâtel

D'après Sturm (1985), les taux de sédimentation annuelle montrent des valeurs étonnement uniformes aux environs de 4 mm/an dans la plupart des lacs étudiés. Pour le lac de Neuchâtel, Portner (1951) avait estimé son taux à 0.7 ± 0.3 mm/an pour l'époque actuelle. Si nous nous référons à une étude récente sur l'analyse pollinique de la végétation autour du lac de Neuchâtel depuis l'Atlantique récent à nos jours (Richoz, 1986), nous obtenons un taux de sédimentation moyen, en pleine profondeur du lac, de 1.56 mm/an durant les derniers 5000 ans. En se restreignant aux 500 dernières années, il atteindrait 1.6 mm/an. Si l'on admet maintenant le flux moyen que nous avons estimé à $4.2 \text{ g/m}^2 \cdot \text{jour}$, on obtiendrait 2.25 mm/an.

Discussion:

Les collecteurs de sédiments peuvent piéger les particules en sédimentation directe et celles qui se retrouvent épisodiquement en resuspension. Ils sont donc susceptibles d'induire un taux de sédimentation légèrement surestimé. En contre-partie, l'eutrophication actuelle du lac procure certainement un flux particulaire supérieur à la moyenne des 500 dernières années. C'est pourquoi une sédimentation moyenne actuelle proche de 2 mm/an peut raisonnablement être avancée.

V. Granulométrie des particules en suspension

V.1. Introduction

Toutes les substances non dissoutes dans l'eau lacustre, quelque soit leur taille, peuvent être considérées comme des matières en suspension. Elles englobent les particules détritiques apportées par les rivières, les minéraux néoformés in situ par précipitation géochimique ou par dégradation biologique de la matière organique, les microorganismes planctoniques ou benthiques, et même la flore et la faune limniques. Toutefois, les méthodes d'étude qui se sont actuellement imposées déterminent des limites granulométriques plus ou moins nettes. Tout d'abord, l'échantillonnage par bouteille anihile pratiquement toute possibilité de récupération d'un organisme vivant de grande taille; de même, il réduit considérablement la probabilité de prélever des grosses particules. En effet, celles-ci sont très rares en regard du nombre de celles de petite taille et de plus, subissent une vitesse de sédimentation nettement plus élevée. La taille de 50 μm peut être communément admise comme limite granulométrique supérieure des particules en suspension étudiées dans le lac de Neuchâtel.

La récupération particulière par filtration sur des membranes celluloseuses de 0.45 μm de porosité ne devrait pas constituer de limite inférieure rigoureuse. Toutefois, bien qu'il ait été démontré qu'après quelques instants de filtration le colmatage des pores du filtre retient des particules plus fines que l'ouverture avouée de la membrane (Meade et al., 1975), l'absence de smectites parmi les minéraux argileux est parfois expliquée par leur passage à travers le filtre.

La concentration des particules en suspension comprises entre la phase colloïdale (0.45 μm) et quelque 50 μm présente une moyenne inférieure à 2.0 mg/l (chap. III). Il est donc instantanément apparu illusoire d'abord leur étude granulométrique avec des méthodes sédimentologiques classiques. Par contre, les propriétés physiques du Compteur Coulter permettent d'obtenir une analyse granulométrique sur des échantillons si restreints.

V.2. Méthodologie: Le Compteur Coulter

Les particules en suspension représentent une population dont la meilleure caractérisation granulométrique est obtenue en examinant chaque élément l'un après l'autre. Le Compteur à résistance Coulter permet cette analyse en ne nécessitant que le seul impératif de placer le produit à étudier en suspension dans un liquide électriquement conducteur. L'appareil utilisé servant indifféremment à l'étude de suspensions marines et lacustres, l'électrolyte choisi est une eau filtrée contenant 35 g/l de NaCl dissous. Sa conductibilité s'approche ainsi de celle de l'eau marine, soit d'une valeur de 45 mS/cm.

A. La principe du Compteur à résistance.

Les modalités de la mesure ont été expliquées par plusieurs auteurs (Guichard et de Bernard, 1965; Copin-Montégut, 1974; Lascaratos, 1974). Selon le principe qu'ils illustrent, le flux continu du liquide conducteur est dirigé du récipient d'analyse vers une sonde où règne une dépression. La solution ainsi aspirée traverse un petit orifice calibré. De part et d'autre de cette micro-ouverture circulaire se trouvent 2 électrodes en platine alimentées par un courant continu. En l'absence de particules, la différence de potentiel entre elles est constante et dépend de la conductivité du liquide. Lorsqu'une particule traverse l'ouverture de la sonde, elle déplace un volume liquide égal à son propre volume et modifie ainsi notablement la résistance du cylindre électrolytique imaginaire constitué par l'orifice. Il se produit alors une impulsion de tension dont l'amplitude est proportionnelle au volume de la particule qui l'a engendrée. Même s'il existe une différence de résistivité entre particules organiques et minérales, elle est négligeable vis-à-vis de leur écart avec celle de l'eau de mer (Guichard et de Bernard, 1965). Les impulsions enregistrées ne dépendent donc pas du tout de la nature particulaire, ni même de leur forme, mais uniquement de leur volume.

B. La constitution du Compteur à résistance.

L'appareil utilisé est du type ZM de COULTER COUNTER, modifié à l'Université de Neuchâtel par PROSPER. Il comprend un Compteur Coulter, un amplificateur logarithmique, un analyseur multicanal et un microprocesseur. Les 128 canaux disponibles enregistrent chaque impulsion correspondant à sa définition granulométrique. Les programmes d'acquisition et de traitement adaptés au microordinateur permettent de calculer le nombre ou le volume particuliers en fonction de leur taille. Le résultat est présenté soit en histogramme, soit en courbe cumulative.

C. Les mesures.

Un bref examen préliminaire au microscope optique ou au MEB permet d'établir rapidement les conditions de mesure du spectre envisagé; parmi les suspensions du lac de Neuchâtel, près de la totalité des particules est inférieure à 35 μm . La sonde optimale peut donc posséder un orifice de 70 μm . La couverture spectrale de 2 à 35 μm est obtenue par la concaténation mathématique de 2 mesures réalisées simultanément sous des conditions électriques propres (Rüch, 1987). Après une vérification de l'étalonnage de l'appareil avec des standards, les particules récoltées par filtration sur des membranes de 0.45 μm de porosité sont humidifiées et remises en suspension dans 100 ml de solution électrolytique. Le temps de comptage dure 100 secondes et le nombre de particules analysées peut s'élever à quelques dizaines de milliers.

Les problèmes de comparaison entre les mesures obtenues par Compteur Coulter et par d'autres méthodes, telles

qu'Atterberg et Sédigraphe, ont été maintes fois abordés (Stein, 1984). Il semble généralement que seul un facteur de correction constant distingue les résultats de deux approches méthodologiques différentes. Il est alors difficile de prêter un appareil aux dépens d'un autre; il faudrait chaque fois rechercher une explication plausible qui, selon Stein (1984), dépendrait souvent de la différence de densité particulaire. Avec le sédigraphe, des particules moins denses généreraient des tailles trop faibles. Le Compteur Coulter constituerait donc un bon moyen pour approcher le spectre granulométrique d'une population en suspension dans un milieu aquatique. De plus, c'est le seul appareil qui puisse se satisfaire de quelques milligrammes d'échantillon pour en fournir une représentation complète.

V.3. Granulométrie

L'analyse granulométrique a été réalisée sur une centaine d'échantillons récoltés entre janvier 1984 et mars 1985. Elle a également été déterminée sur les particules accumulées dans les collecteurs de sédiment en avril, mai et octobre 1986. Ces derniers échantillons, ainsi que l'ensemble des 4 prélèvements mensuels de la station III D, vers Portalan, récoltés à 5, 30, 70 et 105 m de profondeur, ont été étudiés entre 2 et 35 μm . Une partie des autres échantillons n'a par contre pu être analysée que dans sa fraction fine, entre 2 et 10 μm .

A. Granulométrie des échantillons prélevés par bouteille océanographique

1. Résultats:

La plupart des histogrammes granulométriques des particules en suspension dans le lac de Neuchâtel sont bimodaux. Le premier pic se situe vers 4 μm (entre 3.5 et 5.0 μm); le deuxième s'individualise généralement aux alentours de 10 - 12 μm (Fig. 89). Leur intensité respective est comparable en mai; dès le mois de juillet, le rapport entre la deuxième famille et la population fine s'élève considérablement, spécialement dans les couches profondes et dans la vallée septentrionale du lac (Fig. 90: A - B). A côté de ce cortège granulométrique fondamental, quelques échantillons présentent des particularités individuelles plus rares qui peuvent se rassembler dans 3 catégories.

- Tout d'abord, il arrive exceptionnellement que le mode particulaire fin (3 - 5 μm) soit unique (Fig. 91); de même, la deuxième population peut parfois se retrouver isolée (Fig. 92: A - B).

- En second lieu, les échantillons épilimniques (5 et 30 m) de novembre et décembre présentent une distribution unimodale avec un développement maximal intermédiaire vers 7 μm (Fig. 93).

- Les rares prélèvements qui se regroupent dans la troisième catégorie possèdent 3 populations granulométriques bien distinctes; un pic proche de 30 μm vient en effet juxtaposer les 2 modes habituels principaux (Fig. 94). Sur le tableau 6, l'ensemble de ces caractéristiques annuelles est résumé pour la station III D aux diverses profondeurs de la colonne aquatique. La constance remarquable des 2 modes principaux

et les légères disparités qui définissent les 3 catégories annexes y sont illustrées.

TABLEAU 6: Nombre et diamètre des pics du volume particulaire des échantillons de la station de Portalben (III D)

N = Nombre de pics
 D-P1 = Diamètre du premier pic
 D-Pi = Diamètre du pic intermédiaire
 D-P2 = Diamètre du deuxième pic
 D-P3 = Diamètre du troisième pic

DATE	PROF.	N	D-P1	D-Pi	D-P2	D-P3
MAI	5 m	1	-	-	10.0	-
	30 m	3	4.0	-	12.0	32.0
	70 m	3	4.0	-	12.0	29.0
	105 m	2	5.0	-	11.0	-
JUIN	5 m	2	5.0	-	12.0	-
	30 m	1	5.0	-	-	-
	70 m	2	5.0	-	12.0	-
	105 m	2	5.0	-	14.0	-
JUIL	5 m	2	5.0	-	11.0	-
	30 m	2	4.5	-	11.0	-
	70 m	2	4.5	-	12.0	-
	105 m	2	4.5	-	11.0	-
AOÛT	5 m	2	5.0	-	9.0	-
	30 m	2	5.5	-	10.0	-
	70 m	1	-	-	11.0	-
	105 m	3	4.5	-	10.0	28.0
SEPT	5 m	2	5.5	-	9.0	-
	30 m	2	4.5	-	12.0	-
	70 m	2	5.0	-	10.0	-
	105 m	1	-	-	9.0	-
NOV	5 m	1	-	7.5	-	-
	30 m	1	-	7.5	-	-
	70 m	2	4.5	-	8.5	-
	105 m	2	4.5	-	10.0	-
DEC	5 m	2	4.5	7.5	-	-
	30 m	1	-	7.0	-	-
	70 m	2	5.0	-	10.0	-
	105 m	1	-	-	10.0	-
MARS	5 m	2	5.5	-	12.0	-
	30 m	2	5.0	-	12.0	-
	70 m	2	5.0	-	12.0	-
	105 m	2	5.0	-	14.0	-

Les courbes cumulatives du volume particulaire rendent également compte des caractéristiques uni- et poly-modales de la granulométrie des suspensions (Fig. 95: A - B - C). En outre, elles fournissent l'avantage de permettre le calcul de la moyenne de la taille de toutes les populations d'un échantillon (Fig. 96). En période estivale, celle-ci est relativement constante dans les trois niveaux supérieurs; elle est par contre fortement influencée par les particules de $30\text{ }\mu\text{m}$ en mai alors que son élévation de mars est due à la croissance modale de la deuxième population. A 1 mètre du fond, au contraire, son évolution annuelle présente des caractéristiques propres très distinctes de celles des couches susjacentes (Fig. 96).

2. Discussion:

Les deux grandes populations granulométriques des suspensions du lac de Neuchâtel s'individualisent entre 3.5 et $5.0\text{ }\mu\text{m}$ et vers quelques $10\text{ }\mu\text{m}$. La corrélation entre ces tailles particulaires et les spectres de diffraction des rayons X nous permet de formuler une approche de la nature minéralogique des diverses populations. Nous attribuons les essences argileuses et les microcristaux de calcite néoformée à la famille $3.5 - 5.0\text{ }\mu\text{m}$. Les autres minéraux détritiques (Quartz - Feldspaths - Dolomites - Calcites allochtones ...), une partie des particules originaires de la population planctonique épilimnique et divers minéraux néoformés (Oxalates- Phosphates- Carbonates- de calcium; voir chap. VI) sont susceptibles de constituer la famille de $10\text{ }\mu\text{m}$. Ainsi, toute disparition ou apparition d'un nouvel ensemble granulométrique, toute variation du rapport d'intensité entre les 2 pics principaux ou encore tout déplacement de la taille d'un mode, vont déterminer des épisodes locaux ou temporaires caractéristiques.

- La population regroupée autour de $4\text{ }\mu\text{m}$ constitue un stock de particules fines qui peuvent quasiment toujours demeurer en suspension (Brun-Cottan; in Rùch, 1987). Sa disparition exceptionnelle est donc tout à fait logique. Seuls des processus bio-géochimiques capables de créer des amalgamations par digestions biologiques (pellets) ou par aggrégations chimiques (floculation, adsorption) peuvent provoquer son élimination provisoire. La seule disparition des particules fines, en mai 1984 à la surface de la station III D (Fig. 92: A), est synchrone à la première forte explosion algale de l'année limnologique. Elle serait donc imputable aux nouvelles conditions physico-chimiques générées par le développement de ces populations: fortes élévations de la concentration en Oxygène dissous et du PH, assimilation du CO_2 , de la silice et des orthophosphates biodisponibles.

De plus, l'intensité du pic du premier mode peut être affectée artificiellement par la concentration des particules plus grossières; lorsque celle-ci s'élève notablement, elle peut diluer la population fine jusqu'à sa disparition sous le spectre représentatif du deuxième ensemble particulaire. Ainsi, les histogrammes privés du premier mode granulométrique conservent fréquemment

l'ébauche graphique de sa présence écrasée par la prépondérance des particules de $10 \mu\text{m}$ (Fig. 92: B). D'autres échantillons n'atteignent pas cette extrémité et la population fine, bien que minoritaire, n'est pas complètement effacée par le deuxième ensemble modal (Fig. 90: A - B).

Selon ces divers rapports d'intensité, il apparaît fondamental d'établir durant la période estivale une scission entre la granulométrie des matières en suspension dans les eaux de la rive jurassienne et celle de la rive Sud du lac. En effet, les particules de la vallée méridionale définissent presque constamment 2 populations distinctes de même concentration ou très légèrement dominées par la fraction grossière (Fig. 89). Dans la vallée Nord, par contre, l'intensité du pic de $10 \mu\text{m}$ l'emporte toujours très nettement.

- La majorité du flux sédimentaire annuel est très certainement constituée par les particules qui se regroupent vers $10 - 12 \mu\text{m}$. Cette fraction, régulièrement présente, forme un ensemble qui ne devrait pas échapper aux prélèvements par bouteille "Niskin". C'est d'ailleurs cette population qui s'amplifie notablement lorsque la concentration globale s'élève, essentiellement à proximité du fond. La variation du rapport d'intensité entre les pics des deux modes principaux et son aboutissement extrême caractérisé par l'effacement artificiel de la première famille incombent donc fort probablement à son comportement. De plus, l'analyse des courbes granulométriques des dépôts superficiels et des suspensoides de l'eau surnageante révèle les mêmes distinctions et la même suprématie des particules du deuxième mode (Fig. 97).

- L'individualisation éphémère d'une troisième population vers $30 \mu\text{m}$ dans la masse aquatique intermédiaire du mois de mai pourrait provenir des squelettes de certaines diatomées encore vivantes lors du prélèvement ou d'apports détritiques printaniers qui demeurent brièvement en suspension.

En mars 1985, la moyenne de la taille particulaire des échantillons s'accroît sensiblement (Fig. 96). Cette augmentation est due à l'intensification de la deuxième population et à son élévation granulométrique, de même qu'à l'apparition sporadique d'une troisième famille dans la vallée Nord, à l'embouchure de l'Areuse. Sur la station méridionale (III D), les histogrammes conservent leur identité bimodale et ne présentent pas d'évolution tangible avec la profondeur (Fig. 98). La vallée Sud du lac formerait alors une seule masse aquatique bien homogène.

Sur la rive jurassienne, au contraire, les stations III A et III B mettent en évidence de fortes inhomogénéités verticales et locales. En surface et à 30 m , les histogrammes s'apparentent grandement à ceux de la masse d'eau méridionale avec un mode de particules fines et un autre, plus important, vers $12 \mu\text{m}$ (Fig. 99). En

profondeur, c'est-à-dire au-delà de 70 m et à 1 m du fond, la population fine est intensément diluée par l'enrichissement des particules grossières, d'origine probablement allochtone. La structure granulométrique de cette nouvelle entité se manifeste par une dissymétrie positive accentuée du pic ou même par l'apparition d'un troisième pic vers 20 μm (Fig. 100). Nous attribuons l'origine de ces perturbations à des transferts particulaires latéraux certainement engendrés par les apports de l'Areuse. L'analyse granulométrique des suspensions permettrait ainsi de fournir une illustration de la dilution des eaux de l'Areuse dans celles du lac de Neuchâtel en ce mois de mars. Elles s'enfonceraient directement dans la couche benthique, se réfugieraient dans les zones profondes et épargneraient ainsi la rive Sud, au-delà de la Motte. Cette schématisation ne constitue qu'une confirmation plus tangible des disparités moins accentuées observées durant les mois estivaux. La Motte forme bien un relief susceptible d'individualiser les diverses zones morpho-sédimentaires du lac de Neuchâtel.

B. Granulométrie des échantillons prélevés par collecteurs de sédiment.

1. Résultats:

Les 9 échantillons analysés proviennent des 3 périodes d'exposition (25.04.86 - 20.05.86; 20.05.86 - 29.05.86; 04.10.86 - 28.10.86) et des 3 profondeurs aquatiques déterminées par les collecteurs (30 - 60 - 95 m). Chaque mesure a été renouvelée une seconde fois et les résultats sont parfaitement reproductibles. Tous les histogrammes présentent un premier pic vers 5 μm et un deuxième, légèrement plus variable, entre 12 et 18 μm (Fig. 101). Lors d'une même période printanière, la taille particulaire est remarquablement homogène sur toute la colonne d'eau (Fig. 102). Du 25 avril au 20 mai, le rapport entre l'intensité du deuxième pic et celle du premier pic s'approche de 3.65. Il s'élève à 8.5 durant le dernier décan de mai. Pendant le mois d'octobre, les échantillons de 30 et 60 m sont semblables et le rapport modal s'abaisse à 2.0. A 5 m du fond, le spectre se distingue par un spectaculaire enrichissement des particules plus grossières (Fig. 103).

2. Discussion:

Comparativement aux analyses des échantillons prélevés par bouteille, la granulométrie des particules provenant des collecteurs de sédiment fournit des confirmations et des informations complémentaires tout à fait remarquables. Tout d'abord, la présence de 2 populations bien distinctes est confirmée. La population fine, attribuée aux suspensions "permanentes", s'individualise toujours à 5 μm . La deuxième famille, par contre, accentue sa suprématie; son développement maximal se déplace de plus de 10 μm vers 15 μm . Nous pensons que non seulement ces observations peuvent aisément s'expliquer mais qu'elles confirment les mécanismes

sédimentologiques suspectés. En effet, lors d'un prélèvement ponctuel et instantané par bouteille, les particules fines homogénéisées dans la masse d'eau sont récoltées en surnombre comparativement aux grosses particules qui se décantent très rapidement. Par contre, le collecteur de sédiment, exposé durant une longue période, récupère très peu de suspensions fines en sédimentation lente. Au contraire, il récolte toutes les grandes particules qui transitent vers le fond par la colonne d'eau. Il apparaît donc tout à fait normal que le deuxième pic de population s'amplifie au détriment de celui de $5 \mu\text{m}$ qui illustre un ensemble dilué par l'abondance de grains plus grossiers. Les analyses minéralogiques viendront confirmer ces premières observations (chap. VI). En dernier lieu, l'augmentation du rapport d'intensité entre les 2 pics de 3.65 à 8.5 à la fin mai peut s'expliquer par l'évolution printanière du phytoplancton (Diatomées) et par l'intensification de la précipitation carbonatée (Chap. VI).

En octobre, les 2 échantillons supérieurs sont moins affectés par la suprématie des particules plus grossières. Leur histogramme révélerait alors une intensification des suspensions détritiques (Argiles et minéraux en grains) au détriment des cristaux de néoformation. La granulométrie confirmerait ainsi l'hypothèse formulée lors de la détermination du flux particulaire; elle attribuerait une certaine part des suspensions d'octobre à des apports exogènes ou à des remaniements sédimentaires. A proximité du fond, l'histogramme granulométrique (Fig. 103) s'apparente totalement à celui des échantillons de l'interface sédimentaire (Fig. 97). Il nous conduit ainsi à attribuer l'origine de la forte concentration de la couche benthique d'octobre 1986 à des mécanismes locaux et éphémères de resuspensions et/ou de transports en "avalanches".

L'élévation aux environs de $15 \mu\text{m}$ de la taille moyenne des particules de la deuxième population lorsqu'elles sont prélevées par collecteurs pourrait également provenir du système d'échantillonnage. Il est fort possible que cet ensemble particulaire n'avait été que faiblement récupéré par bouteille; l'analyse de son spectre total mesurerait alors le pic développé précédemment vers $10 \mu\text{m}$. Cette observation tendrait à suspecter une limite "statistique" maximale de la taille des particules récoltées par bouteille "Niskin".

V.4. Essai de caractérisation du flux particulaire à partir des analyses granulométriques.

La détermination du flux total a été calculée à partir de la masse particulaire déposée dans les collecteurs durant 2 périodes d'exposition printanières. Il atteint respectivement 6.8 et $8.2 \text{ g/m}^2 \cdot \text{jour}$. L'approche de cette détermination a également été tentée par l'analyse des spectres granulométriques de ces mêmes particules. L'élaboration et la démonstration d'une telle démarche ont déjà été abordées en milieu marin (Lambert et al., 1981). A la suite de la valeur comparative des résultats, cette

méthode a également été appliquée aux suspensions récupérées par filtration de volumes d'eau récoltés par bouteilles.

Le flux total est obtenu par l'équation:

FLUX = Concentration * Vitesse de chute des particules

Comme les particules sont dans un milieu fluide et que leur chute est considérée verticale, la loi de Stokes peut être appliquée pour calculer leur vitesse de sédimentation. L'équation devient alors:

FLUX = Concentration * $\frac{2}{9} \cdot (f - f') \cdot g \cdot R^2/n$

avec: f = masse volumique des particules dans l'eau, soit 2.65 g/cm^3
 f' = masse volumique du fluide, soit 1.00 g/cm^3
 g = gravité, soit 981 cm/s^2
 R = rayon des particules
 n = viscosité du fluide, c.à.d. de l'eau à env. 6°C , soit $1.5 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}\cdot\text{s}$.

Durant toute la période d'exposition des collecteurs, la turbidité a été mesurée plusieurs fois (chap. III). Elle a'apparente à celle des couches hypolimniques claires et s'élève à environ 0.5 FTU. Selon la relation admise précédemment, la concentration s'élèverait alors à:

Conc [mg/l] = $1.7 \cdot \text{Conc [FTU]}$

Donc; Conc = 0.85 mg/l

Cependant, la distribution granulométrique est bimodale avec une population proche de $5 \mu\text{m}$ et une autre de $15 \mu\text{m}$. Si l'on admet que les particules fines ne peuvent sédimenter selon la loi de Stokes, leur vitesse de chute étant du même ordre de grandeur que leur dispersion par diffusion turbulente (Brun-Cottan; in Rùch, 1987), seules celles qui appartiennent au second mode détermineront le flux particulaire. La concentration se réduit donc selon le même rapport que la surface des pics granulométriques. A la suite de cette modulation et selon la vitesse de chute des particules qui dépend du rayon particulaire, le flux peut être calculé pour cette population granulométrique. Sa valeur est comparable à celle obtenue par pesée des dépôts récoltés dans les collecteurs (Tableau 7). Selon les mêmes calculs, le flux obtenu par la granulométrie des échantillons mensuels prélevés tout au long du printemps 1984 par bouteille "Niskin" s'élève à $3.7 \text{ g/m}^2\cdot\text{jour}$. Le pourcentage de concentration de la deuxième population a ici été évalué approximativement sur la moyenne de tous les histogrammes.

TABLEAU 7: Caractéristiques physiques des particules en suspension durant diverses périodes et selon divers types de prélèvements:

A = échantillonnage par collecteurs: 25.04.86 - 20.05.86
 B = échantillonnage per collecteurs: 20.05.86 - 29.05.86
 C = échantillonnage par bouteille : Moyenne printemps 84

	A	B	C
FLUX selon pesée [g/m ² ·jour]	6.8	8.2	
Rayon des particu- les de la deuxième population [cm]:	$0.75 \cdot 10^{-3}$	$0.75 \cdot 10^{-3}$	$0.6 \cdot 10^{-3}$
Vitesse de chute des particules de la 2ème population [m/jour]:	11.65	11.65	7.45
Proportion des parti- cules de la deuxième population [%]:	75	85	60
Concentration de la deuxième population [g/cm ³]:	$0.64 \cdot 10^{-6}$	$0.72 \cdot 10^{-6}$	$0.5 \cdot 10^{-6}$
FLUX selon granulomé- trie [g/m ² ·jour]	7.45	8.4	3.7

Discussion:

Malgré l'excellente reproductibilité des résultats, il nous est indispensable de formuler certaines précautions vis-à-vis de cette méthode. Dans l'application de la loi de Stokes, la viscosité et la masse volumique de l'eau ne présentent pas de problèmes majeurs. Par contre, la signification de la mesure du rayon particulaire doit absolument être claire avant l'attribution d'une densité aux particules en suspension. En effet, dans leur milieu naturel, les suspensoides fins forment généralement des aggrégats organo-minéralogiques très poreux. Leur volume

s'accroît alors conjointement à la diminution de leur densité et de leur vitesse de sédimentation. Toutefois, les entités particulières analysées au Coulter ont été fractionnées et épurées de leur liant organique. Les mesures reflètent alors bien la taille des particules de base, constitutives d'aggrégats en milieu lacustre et celle des grains plus grossiers, certainement moins affectés par les processus d'amalgamation.

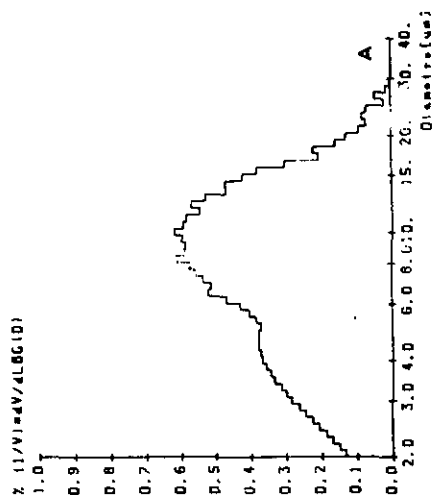
Dans notre calcul de la vitesse et du flux particuliers, seule la deuxième population a été conservée, c'est-à-dire celle qui est dominée par les minéraux en grains. La densité s'apparente donc à celle des éléments individuels, soit de la calcite, de la silice et d'autres minéraux détritiques; elle s'approche ainsi de 2.65 g/cm^3 . Une masse volumique beaucoup plus faible se rapporterait à des suspensoides amalgamés que nous n'avons manifestement pas mesurés.

L'analyse de la structure estivale des profils turbiditiques avaient permis de déterminer une vitesse d'enfoncement de la couche pélagique néphéloïdale (PNL) équivalente à environ 1 m/jour (chap. III.4). Cette vitesse a été attribuée à celle de la sédimentation particulaire totale. Elle est parfaitement similaire à celle qui a été calculée dans le lac de Zoug (Bloesch and Sturm; 1984).

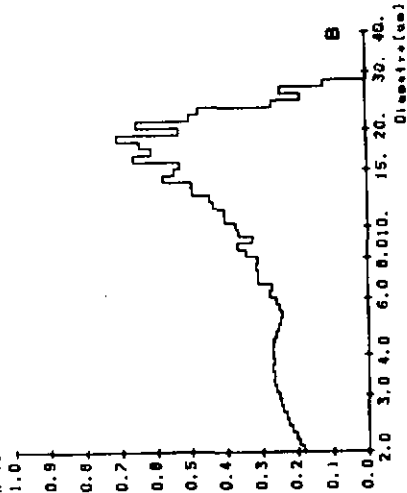
Les vitesses obtenues à partir des déterminations granulométriques des particules sont sensiblement plus importantes (environ 12 m/jour). Elles sont toutefois uniquement le reflet de la sédimentation des fractions plus élevées que $5 \mu\text{m}$ de diamètre. Or, durant les périodes tardi-printanières de prélèvement, il y a une abondance de diatomées et de calcites néoformées; ces grains sont alors capables d'induire une élévation appréciable de la vitesse de chute des particules en suspension. A certaines périodes de haute précipitation carbonatée, cette vitesse pourrait même atteindre 100 m/jour (Sturm et al.; 1982). Il n'y aurait donc aucune incompatibilité entre la vitesse de sédimentation totale de 1 m/jour et la vitesse de 12 m/jour pour la deuxième fraction granulométrique proche de $15 \mu\text{m}$ de diamètre.

Comme il avait été admis que seule cette population constituait la part prédominante des dépôts sédimentaires, il est logique que le calcul de son flux sédimentaire s'apparente au flux total déterminé par pesée des suspensions piégées dans les collecteurs. L'analyse granulométrique de ces particules permet donc de définir le flux particulaire principal, et finalement une approximation du taux de sédimentation annuelle.

Par contre, le flux déterminé à partir de la granulométrie des particules récoltées par bouteilles et filtrées sur membranes n'est pas comparable à celui qui a pu être obtenu par la pesée des dépôts des pièges ou par leur taille particulaire (Tableau 7). La fraction fine également supprimée pour le calcul, il est nettement sous-estimé car il ne représente qu'une partie de la deuxième population. Il serait donc inopportun de tenter d'établir un flux sédimentaire à partir des analyses granulométriques de telles associations particulières trop affectées par la ségrégation du mode d'échantillonnage.



Z (1/V) dV/dLOG(D)



Diametre(um)

FIG. 89: Spectra granulométrique bimodal typique de la population particulière en suspension dans la vallée méridionale du lac: station III D - 1 m du fond - 22 mai 84.

FIG. 90:A-B: Suprématurie de la population du deuxième mode granulométrique, spécialement développée dans le haut-lac (A: station V - 50 m - 4 juillet 84) et dans la vallée Nord (B: station III D - 1 m du fond - 22 mai 84).

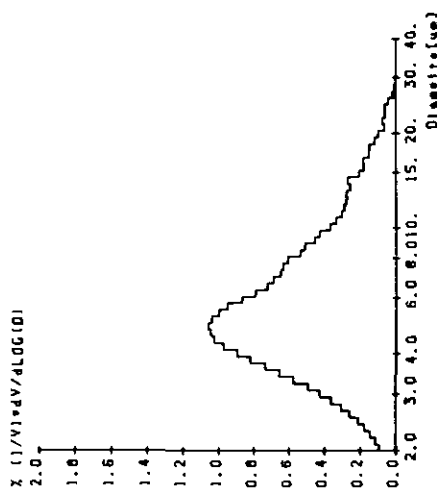


FIG. 91: Population granulométrique fine unimodale (station III D - 30 m - 12 juin 84).

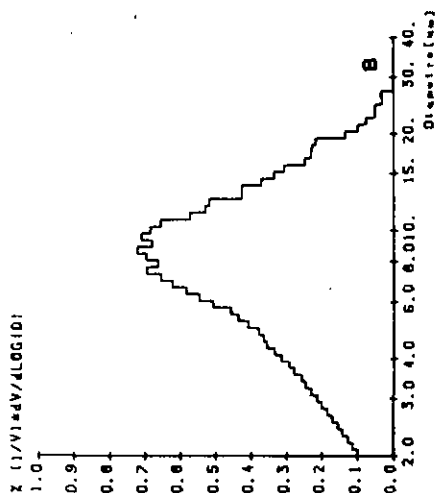
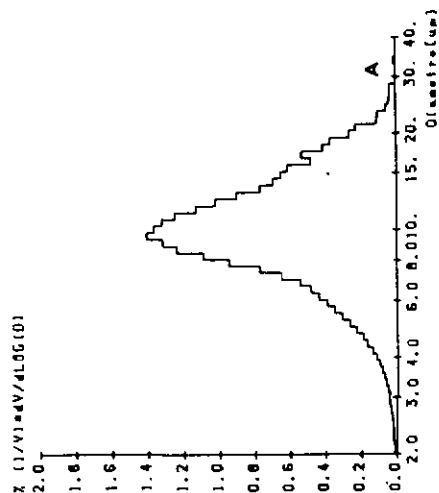


FIG. 92:A-B: Disparition exceptionnelle de la population du 1er mode granulométrique (A: III D - 5 m - 22 mai 84 et B: III B - 1 m du fond - 6 août 84).

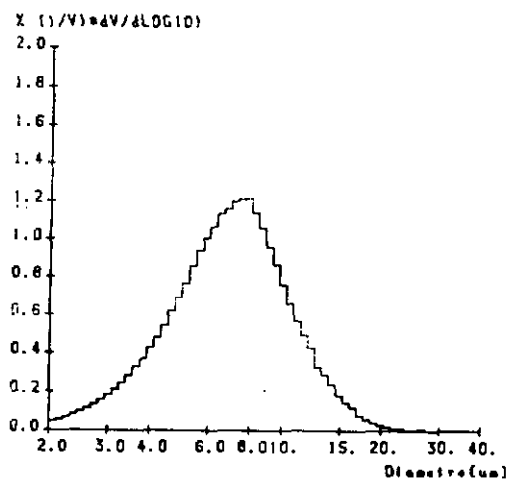


FIG. 93: Particularité épilimnique automnale symbolisée par une seule population granulométrique entre les 2 modes habituels (III D - 30 m - 12 novembre 84).

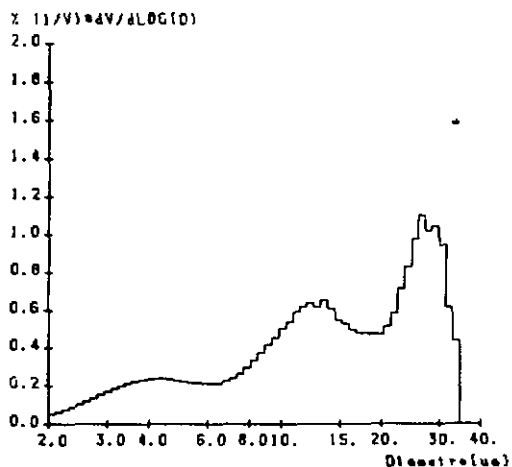


FIG: 94: Présence exceptionnelle de 3 modes granulométriques (III D - 70 m - 22 mai 84).

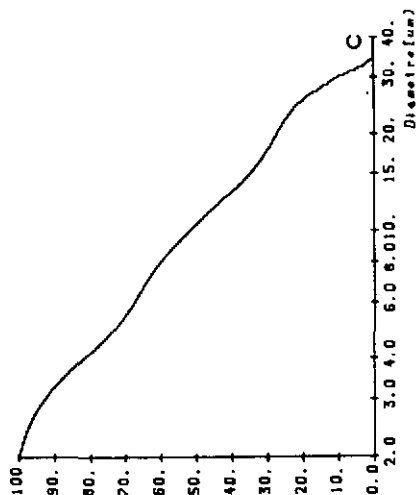
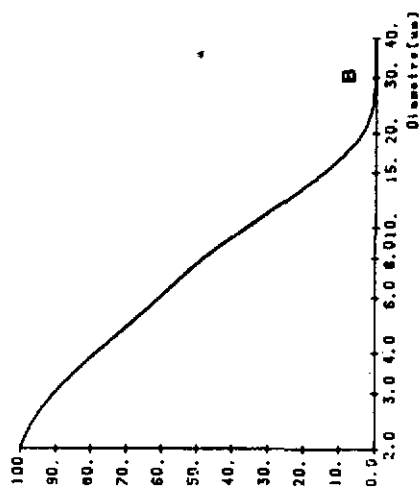
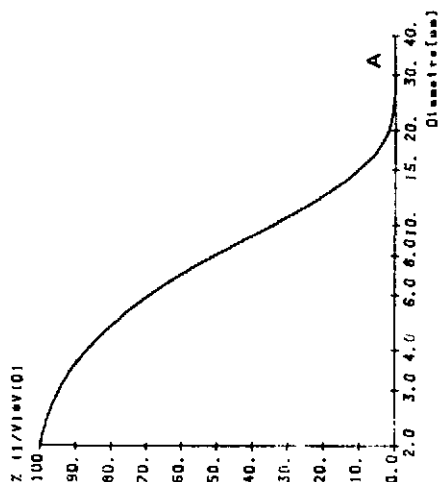
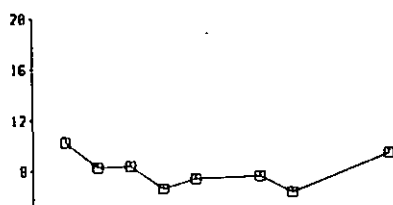
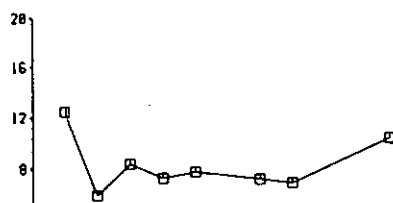


FIG: 95: Courbes des populations cumulatives
caractéristiques unimodales (A: III D - 1 m
granulométriques du fond - 14 septembre 84), bimodales (B:
III D - 30 m - 4 juillet 84) et trimodales
(C: III D - 30 m - 22 mai 84).

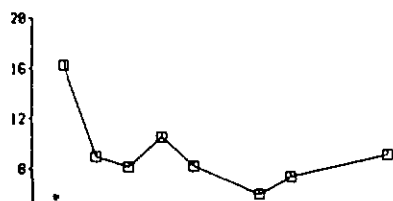
MOYENNE PROF = 5M



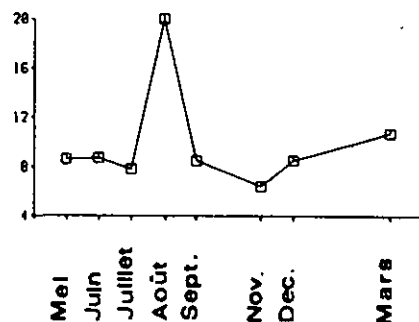
PROF = 30 M



PROF = 80 M



PROF = 105 M



1984

FIG. 96: Evolution annuelle de la moyenne granulométrique des particules en suspension aux divers niveaux de la station III D.

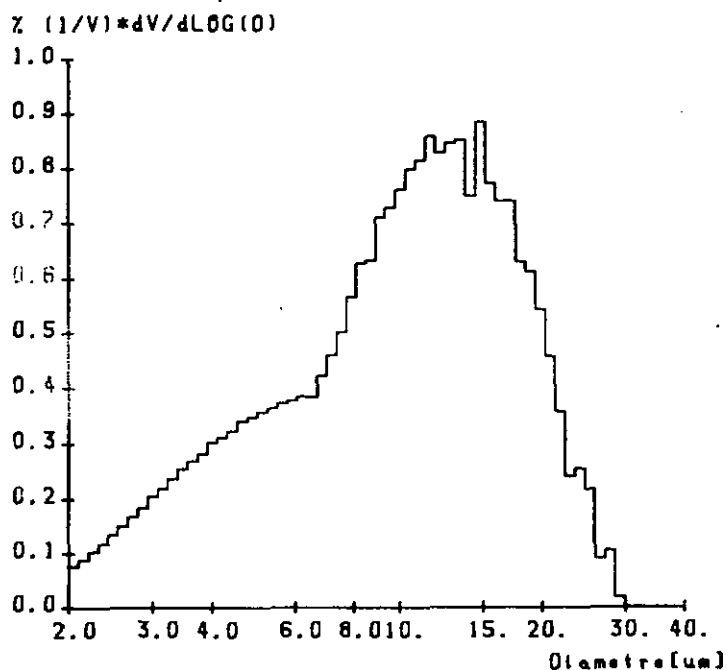


FIG. 97: Spectre granulométrique caractéristique des particules d'interface et en suspension dans l'eau surnageante (station P16, FIG. 9).

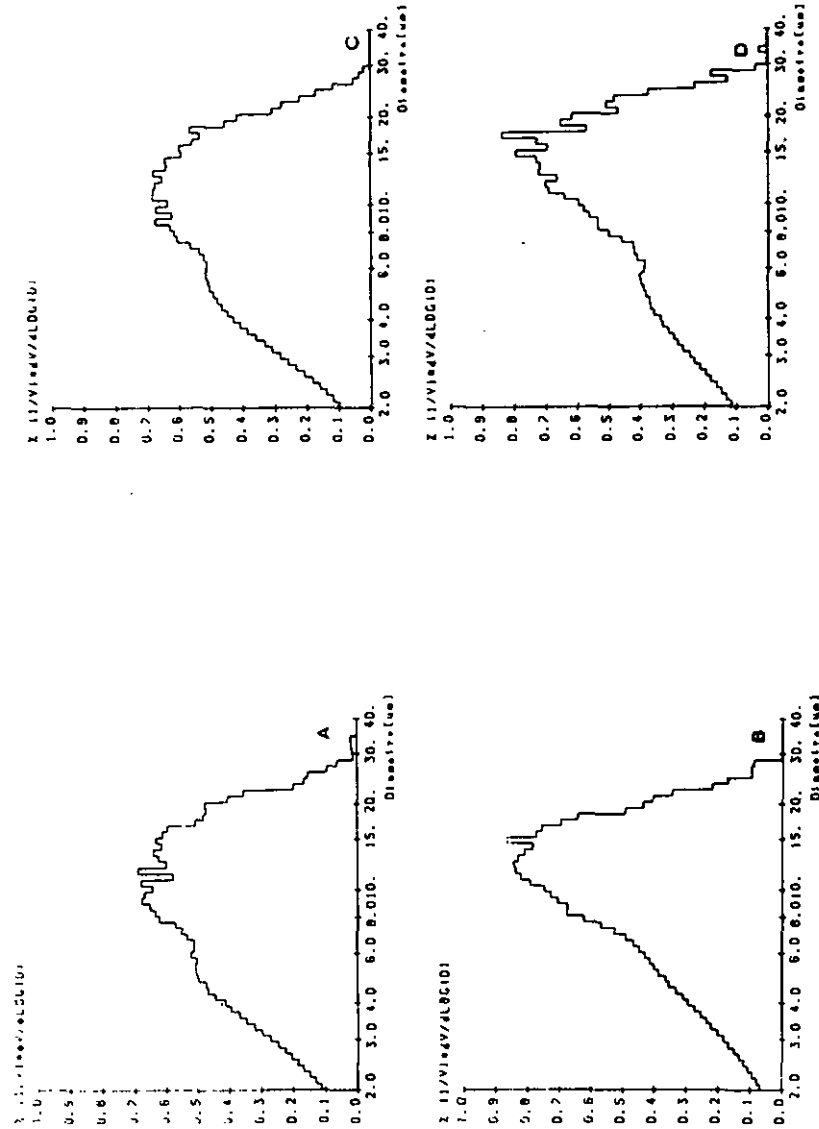


FIG. 98: Similarité granulométrique des particules de tous les niveaux aquatiques de la station III D en mars 1985 (A = 5 m; B = 30 m; C = 80 m; D = 100 m).

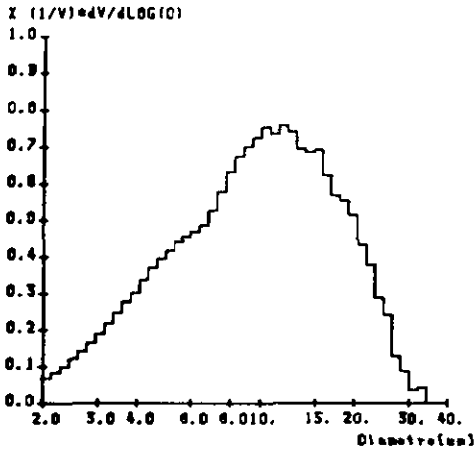


FIG. 99: Spectre granulométrique des suspensions des niveaux supérieurs de la station III B (5 m), sur la vallée Nord, comparable à ceux de la vallée Sud représentés sur la FIG. 98, le 13 mars 85.

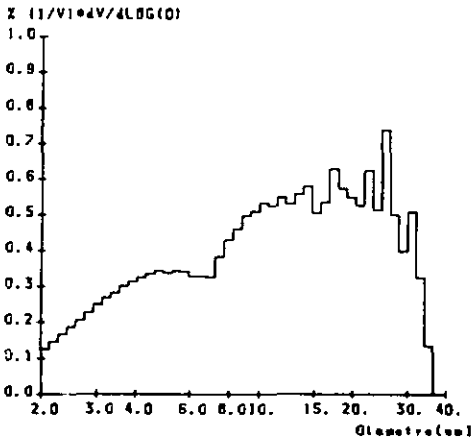


FIG. 100: Particularité des suspensions hypolimniques de la vallée Nord, en mars 85 (III B - 80 m): intensification de la population fine et élargissement du pic représentatif de la 2ème population vers des tailles plus grossières.

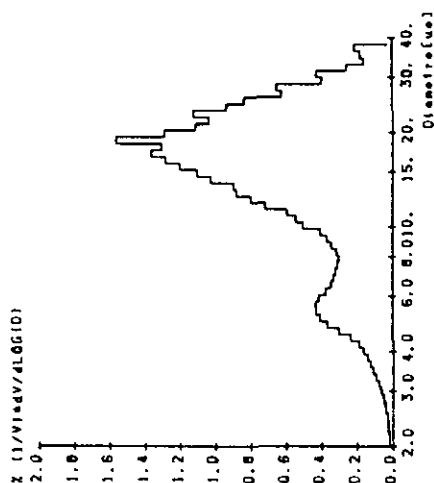


FIG. 101: Spectre granulométrique typique des particules récoltées par pièges entre le 25 avril et le 20 mai 1986 (station NNPLAINE - 30 m).

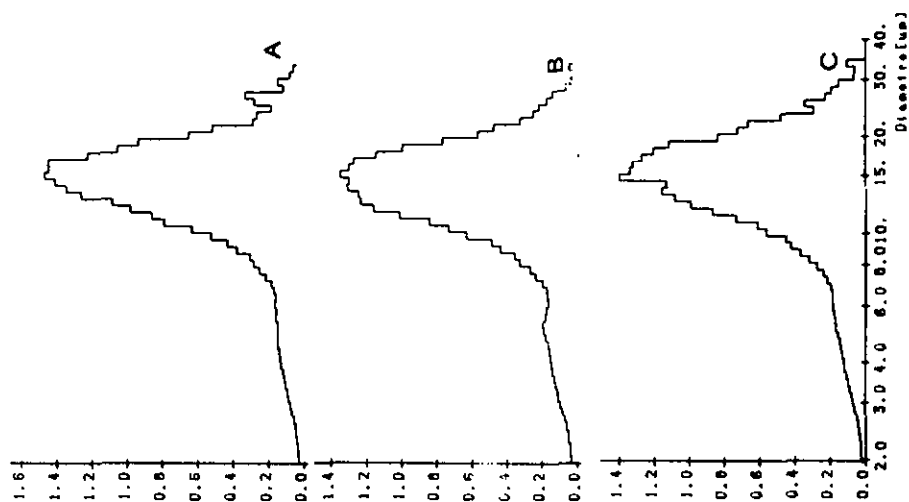


FIG. 102: Spectres granulométriques caractéristiques des particules récoltées par pièges entre le 20 et 29 mai 1986 montrant une parfaite similarité entre les différents niveaux (A = 30 m; B = 60 m; C = 95 m).

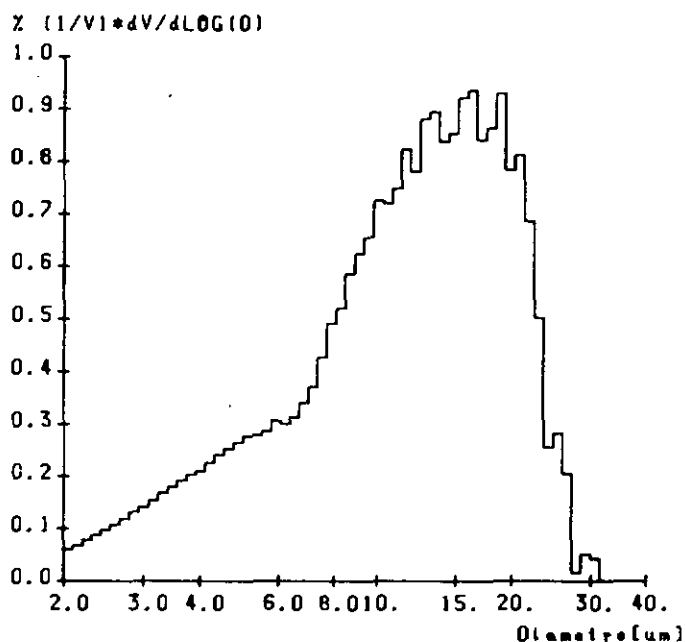


FIG. 103: Spectre granulométrique des particules récoltées par pièges en octobre 1986, à 5 m du fond.

VI. Minéralogie des particules en suspension

VI.1. Introduction.

L'importance de l'étude quantitative et qualitative des matières en suspension (MES) n'a été appréciée que récemment. Elles sont pourtant le reflet du comportement dynamique, géochimique, biologique et géologique d'un milieu marin ou lacustre. Des sources multiples, telles qu'affluents fluviaux, atmosphère, bioproduction, précipitation chimique et resuspension conditionnent leur concentration, leur granulométrie et leur composition (Sturm, 1985). D'origine externe, les minéraux allochènes transportés dans le bassin de sédimentation permettant, suivant leur association, de définir des provinces hydrodynamiques et sédimentologiques en jouant le rôle de traceurs naturels. Les minéraux endogènes, formés dans la colonne d'eau, dépendent des conditions physico-chimiques et biologiques du milieu. De plus, la présence sporadique de minéraux authigènes en suspension, formés dans le sédiment, permet d'approcher la dynamique des couches profondes sur l'interface sédimentaire. Enfin, toutes les particules peuvent constituer un support géochimique occasionnel ou définitif et un véhicule sédimentologique pour de nombreux éléments chimiques qui formeront ensemble les sédiments futurs.

Dans le lac de Neuchâtel, la concentration des matières en suspension dépend de l'intensité des apports terrigènes, de la prolifération planctonique printanière et estivale, de la précipitation minéralogique, du taux de sédimentation particulaire et des remises en suspension locales et épisodiques des sédiments d'interface. L'alternance, la combinaison ou la domination temporelles de certains processus définiront ainsi la succession saisonnière des diverses associations minéralogiques.

VI.2. Procédures expérimentales.

Au cours de l'année 1984, 7 campagnes mensuelles d'échantillonnage ont été effectuées sur 4 stations du lac (Tableau 1). Les sites choisis s'étendent au large de l'embouchure de l'Areuse. Ils forment un profil transversal qui recoupe la vallée septentrionale profonde, la Motte et la vallée méridionale (Fig. 8). De plus, le 4 juillet 1984, l'échantillonnage a été généralisé à une quinzaine de stations sur l'ensemble du lac (Fig. 8). Les prélèvements de 10 litres ont lieu à 5 m (épilimnium), 30 m (métalimnium), 80 m (hypolimnium) et à 1 m du fond. L'eau récoltée est immédiatement formolée, amenée au laboratoire et filtrée dans les 24 heures.

La récupération des particules en suspension a été soumise à différentes approches expérimentales. Il semble finalement que, tout comme en océanographie où les concentrations sont encore 20 à 50 fois plus faibles que dans le lac de Neuchâtel, les méthodes de centrifugation et de sédimentation soient beaucoup plus fastidieuses que la filtration, méthode largement adoptée (Lal, 1977). Seule la récupération in situ par trappes à sédiments la supplante

avantageusement, mais avec des moyens techniques considérablement plus importants (Rathke et al., 1981; Sturm et al., 1982; Sturm, 1985).

Suivant la méthode définie par Milliman et al. (1975), la suspension est injectée sous une pression de 2.5 bars sur un filtre "Millipore HAWP" de 142 mm de diamètre et 0.45 μ m de porosité. Les particules sont ensuite remises en suspension par ultrasons dans 100 ml d'eau distillée légèrement oxydée (3 % H₂O₂). Après l'évaporation de cette solution à 60 °C, le résidu sec est repris par de l'eau distillée et récupéré sur un filtre en argent de petit diamètre (25 mm) et 0.45 μ m de porosité (Manheim et al., 1972). La préparation ainsi réalisée, représentant environ 5 à 8 mg de matière minérale, peut alors être soumise à la diffraction des rayons X sur un appareil Philips fonctionnant avec un programme lent:

- Vitesse de rotation du goniomètre: 1/2 °/min
- Vitesse de déroulement du papier : 1 cm/°
- Rayonnement CuK α ; 40 KW; 18 mA
- Constante de temps : 4 secondes
- Coefficient pleine échelle : 4 $\cdot$ 10²

VI.3. Les associations minéralogiques.

La composition des particules qui constituent les diverses associations minéralogiques des matières en suspension (MES) dépend de l'évolution du rapport entre les minéraux allochènes, endogènes et authigènes. Celui-ci est fortement influencé par les saisons, mais également par la localisation géographique, la profondeur et la proximité d'un delta ou de l'interface sédimentaire.

C'est pourquoi nous avons défini 3 associations minéralogiques dépendant essentiellement de l'origine des particules:

A: les suspensions qui proviennent surtout des apports détritiques des rivières et peut-être accessoirement des apports éoliens; ces derniers n'ont malheureusement pas pu être rigoureusement individualisés. L'association regroupe les minéraux argileux et silicatés.

B: les suspensions qui proviennent de divers mécanismes de néoformation géobiochimique. Elles sont principalement représentées par la calcite endogène, mais également par différentes formes calciques telles que les phosphates, oxalates, sulfates et formates de Calcium.

C: les suspensions qui proviennent des résidus solides des kyetes d'organismes planctoniques tels que les diatomées.

Il faut toutefois reconnaître d'emblée que malgré l'excellent cadre général qu'elle constitue, cette classification est très rigide. Bien souvent, certaines attributions minéralogiques seraient trop rigoureuses sans recouper les limites des définitions préliminaires. Ainsi, certains minéraux peuvent avoir une origine multiple: la calcite est essentiellement endogène, mais une petite proportion peut avoir une source allochtone; le quartz

provient des apports détritiques, mais aussi indirectement des kystes de diatomées; les phosphates, oxalates, sulphates et formates de Calcium sont certainement néoformés, mais leur origine géobiochimique peut être divergente. De plus, des mécanismes de resuspension locale et épisodique peuvent perturber l'ensemble particulaire par des enrichissements détritiques, mais aussi par des minéraux authigènes et endogènes.

A. Les particules d'origine essentiellement allochtone.

1. Les minéraux argileux:

La CMLORITE et la MUSCOVITE constituent l'essentiel du stock argileux déritique (Fig. 104). Leur origine allochtone est confirmée par leur forte concentration dans les suspensions des affluents du lac. L'appréciation des intensités minéralogiques a été effectuée selon les méthodes habituelles de mesure de la hauteur des pics. Elle révèle une évolution annuelle très similaire pour la chlorite (002) et la muscovite (001). Lors de la campagne d'avril, leur intensité moyenne est élevée; elle s'affaiblit nettement durant l'été pour montrer une nouvelle intensification de septembre à décembre (Tableau 8).

TABLEAU 8: Intensités minéralogiques moyennes (hauteur des pics en mm) de la chlorite et de la muscovite lors de chaque campagne.

DATE	CHLORITE	MUSCOVITE
27.04.84	35 mm	26 mm
22.05.84	11	7
12.06.84	5	3
04.07.84	10	5
06.08.84	5	4
14.09.84	26	28
12.11.84	20	18
05.12.84	28	29

Selon la même approche, la moyenne annuelle du stock argileux est supérieure sur la rive jurassienne, au NW, que sur la rive molassique, vers le SE; elle est minimale sur la Motte (Tableau 9). Sur une même station, la concentration des argiles augmente légèrement avec la profondeur. Elle

est toutefois continuellement élevée à 30 m de profondeur sur la station B, au large de l'embouchure de l'Areuse (Tableau 10).

TABLEAU 9: Intensité annuelle moyenne (hauteur des pics en mm) de la chlorite et de la muscovite sur les 4 stations en 1984.

STATION - RIVE	CHLORITE	MUSCOVITE	MOYENNE
A - NW	15.0	13.0	14.0
B - NW	15.0	13.0	14.0
C - MOTTE	13.0	9.0	11.0
D - SE	13.0	12.0	12.5

TABLEAU 10: Evolution verticale de l'intensité annuelle moyenne (hauteur des pics en mm) de la chlorite et de la muscovite sur les 4 stations en 1984.

STATION	PROF.	RIVE	CHLORITE	MUSCOVITE
A	5 m	NW	12.0	11.0
A	30 m	NW	15.0	12.0
A	48 m	NW	17.0	17.0
B	5 m	NW	7.0	6.0
B	30 m	NW	28.0	25.0
B	80 m	NW	13.0	12.0
B	130 m	NW	14.0	10.0
C	5 m	MOTTE	12.0	8.0
C	8 m	MOTTE	14.0	11.0
D	5 m	SE	13.0	11.0
D	30 m	SE	9.0	7.0
D	70 m	SE	10.0	10.0
D	100 m	SE	20.0	20.0

La moyenne annuelle du rapport Muscovite (001)/Chlorite (002) se maintient toujours entre 0.5 et 1.0. Elle présente un minimum estival et une nette augmentation au début de l'hiver (Fig. 105). Son évolution s'apparente à celle de l'intensité propre des minéraux argileux. L'élévation de la concentration des argiles dépendrait donc essentiellement de l'augmentation des micas détritiques.

Malgré sa présence fréquente dans les suspensions des rivières jurassiennes (Serrière, Arèues, Arnon), la KAOLINITE n'apparaît que très sporadiquement dans le matériel particulaire du lac. Elle est toujours absente dans la vallée SE mais elle décelée par intermittence à la station de pompage de Cudrfin, dans le bas-lac. La plus forte concentration kaolinique se développe toutefois au large de l'embouchure de la Serrière (Fig. 106) et, un peu moins nettement, de celle de l'Arèue, spécialement à proximité du fond.

Quant à la SMECTITE, pourtant abondante dans certaines formations géologiques et quaternaires du Jura (Pochon, 1978; Persoz, 1982; Adatte et Rumley, 1984) et du Plateau (Monnier, 1979), elle est quasiment inconnue de la phase particulaire analysée dans le lac de Neuchâtel. Cette absence pourrait s'expliquer par la faible concentration totale des minéraux terrigènes et par leur dilution dans la phase carbonatée et organique. Il est en effet apparu au cours d'études comparatives que la smectite pouvait disparaître des spectres de détection minéralogique par diffraction des rayons X lorsque la concentration déposée sur un filtre devenait trop faible. Il a été démontré (Tucholke, 1974) qu'un sédiment qui présente des smectites lorsque sa concentration demeure élevée s'en retrouve complètement dépourvu après une dilution. Dans un même site, la détection minéralogique d'un sédiment très dilué (0.20 g/cm³) s'apparente alors à celle des MES; les 2 échantillons sont exempts de smectites (Tucholke, 1974). Cette explication de l'absence de montmorillonites nous paraît plus opportune que celle qui l'attribuerait au passage des particules très fines au travers des membranes de 0.45 µm durant la filtration. Plusieurs auteurs ayant abordé ce problème ont conclu que la porosité effective s'atténue très rapidement après le passage d'un faible volume de suspension (Tucholke, 1974; Meade et al., 1975; etc.).

L'analyse des MES des affluents jurassiens confirmerait cette hypothèse. En effet, lorsque les concentrations sont faibles, les particules sont récupérées par filtration; les smectites sont alors régulièrement absentes. Par contre, le 29 novembre 1983, les rivières étaient fortement en crue et la concentration de leurs suspensions très élevées. La récupération a alors pu se faire par décantation et centrifugation. Après un fractionnement granulométrique, la smectite a été décelée, certes faiblement, dans tous les échantillons des fractions fines (Fig. 107). Il semble donc bien que la détection des minéraux gonflants soit tributaire de la concentration soumise à l'analyse et que celle-ci soit rarement suffisante dans le cas des particules en suspension dans un milieu aquatique.

Finalement, des traces de PALLYGORSKITE ont été observées dans les MES de la rive NW et en décembre 1984 seulement. La préservation de ce minéral [Si₈ Mg₅ O₂₀ (OH)₂ (OH₂)₄ . 4 H₂O] requiert un environnement chimique alcalin (Carroll, 1970); il a été trouvé dans des formations actuelles, dans des milieux toujours riches en cations tels que des lacs et des sols (Caillère et Hénin, 1963). Comme il a été identifié dans certaines formations jurassiennes (Rübler, 1962; Persoz, 1982), sa présence dans le lac de Neuchâtel est donc tout à fait plausible.

2. Le talc $[Mg_3 Si_4 O_{10} (OH)_2]$:

La présence sporadique du talc dans les particules en suspension paraît à priori assez incompréhensible. Son identification est très peu répandue dans les sédiments, mais elle s'intensifie dans la phase particulaire, tout comme en milieu marin (Emery et al., 1973; Milliman et al., 1975). Bien que sa concentration régionale et saisonnière soit assez inhomogène, il est tout à fait possible d'en déterminer certaines aires de répartition. Les 2 rivières qui traversent la ville de Neuchâtel (Serrière et Sayon) contiennent régulièrement une importante concentration de talc qui se retrouve ensuite dans les suspensions et les sédiments lacustres au large de leur embouchure (Fig. 106); il atteint même la rive SE du bas-lac, entre Portalban et Cudrefin (Fig. 108 et Fig. 118). Il se retrouve ensuite généralement dans les MES de l'émissaire de la Thielle. A l'exception du mois de novembre, les 2 stations de la vallée NW sont toujours exemptes de talc. Elles s'opposent à la station de la vallée méridionale, au-delà de la Motte, qui en renferme régulièrement dans une partie de ses prélèvements.

De manière générale, tous les affluents contiennent alternativement du talc. Il est donc possible, tout comme Pierce et al. (1971), d'émettre une origine anthropogénique de sa dispersion dans les rivières. En effet, l'emploi du talc est courant dans l'industrie des cosmétiques, peintures, papiers et autres diluents d'aérosols insecticides. Il serait suffisant pour induire une pollution minéralogique perceptible dans les matières en suspension (Pierce et al.; 1971). Sa répartition aquatique ultérieure par les courants lacustres en ferait alors un traceur pour définir diverses provinces et expliquer sa présence locale et sporadique. Sa concentration dans le bas-lac serait conditionnée par les apports du Seyon, de la Serrière et parfois de l'Areusa. La dominance des courants d'Ouest le dirigerait vers l'Est et le Nord-Est, expliquant ainsi sa présence régulière à Portalban et à Cudrefin. Une deuxième province serait délimitée par la vallée septentrionale profonde, dépourvue de talc jusqu'en novembre. Lors de cette campagne, un régime préliminaire de bise aurait pu provisoirement orienter la décharge de ces mêmes rivières vers le Sud-Ouest et expliquer ainsi cette disparité tardi-automnale. Enfin, la province du haut-lac, sporadiquement pourvue en talc par l'Arnon, la Thielle (Fig. 109) ou la Mentue, s'écoulerait vers le NE par la vallée méridionale, quatrième aire aquatique. Ces observations confirmeraient alors les conclusions émises dans l'étude turbiditique des couches hypolimniques qui distinguait cette vallée par une concentration particulaire supérieure à celle du Nord de la Motte (Bapst et Kübler, 1987).

3. Les minéraux silicatés:

Le quartz forme la concentration majeure de cette famille minéralogique. Les feldspaths potassiques et les plagioclases montrent une présence régulière mais seulement accessoire (Fig. 104 - 106 - 109). L'appréciation de l'évolution annuelle du quartz ne se dissocie pas beaucoup

de celle des argiles. D'ailleurs, la concentration du quartz est constamment très élevée dans les MES des rivières périlacustres; elle confirmerait ainsi l'importance des apports allochtones vers le bassin du lac. En automne, sa forte intensité est corrélaire à celle des argiles détritiques.

Il n'est malheureusement pas possible d'estimer par diffraction des RX le rapport entre le matériel quartzitique terrigène et les particules siliceuses du plancton. D'autres études susceptibles de doser la silice amorphe de ces organismes n'ont pu être réalisées si ce n'est quelques observations qualitatives au MEB pour reconnaître les espèces diatomiques les plus répandues (chap. VI.C).

4. Discussion:

La combinaison des observations réalisées sur la répartition des kaolinites et du talc permet de déterminer 4 masses aquatiques dans le lac de Neuchâtel (Fig.110). La première (I) recouvre le bas-lac, au NE de la Motte; elle contient régulièrement du talc et de la kaolinite apportés par les rivières jurassiennes et dispersés jusqu'à la rive de Portalban-Cudrefin. La deuxième province (II) se confond à la vallée NW; elle est marquée par les apports de l'Areuse: présence sporadique de kaolinite, traces de palygorskite en décembre, absence totale de talc sauf en novembre où il aurait été ramené par un courant dominant du NE. La troisième aire (III) semble s'identifier par le transfert longitudinal des eaux du haut-lac vers le bas-lac par la vallée méridionale. Elle est exempte de kaolinite; par contre, elle renferme des traces de talc qui proviendraient de la masse d'eau du haut-lac (IV), enrichie par ses affluents du Plateau et du Jura.

B. Les particules d'origine essentiellement autochtone.

1. Les carbonates de calcium:

La CALCITE, la DOLOMITE et la VATERITE constituent la population carbonatée des MES du lac de Neuchâtel. Elle peut avoir 3 origines distinctes (Kelts and Hsü, 1978):

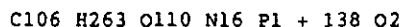
- Les particules d'érosion d'un bassin versant carbonaté apportées au lac par ses affluents.
- Les particules bioclastiques produites par des organismes et le plancton.
- Les particules minérales engendrées par la précipitation inorganique primaire ou par l'activité bactériologique.

Cependant, la détermination de la nature originelle des cristaux de calcite est souvent un problème. Dans le lac de Neuchâtel, la concentration calcitique moyenne approchée par diffraction des RX augmente régulièrement d'avril à août. Elle diminue en automne et s'anéantit pratiquement en novembre et décembre (Fig. 111). Un échantillonnage supplémentaire en mars 1985 n'a également révélé aucune trace de calcite. Il apparaît donc clairement qu'elle possède une source

endogène importante et que sa concentration est tributaire de l'évolution thermique et du cycle biologique du lac (Portner, 1951). De plus, en juillet et août, de nombreux prélèvements contiennent de la vaterite, ou micro-calcite (Fig. 112-113); cette présence confirme indubitablement la prédominance de la précipitation chimique sur les autres causes potentielles de formation de particules carbonatées. Enfin, l'analyse des grains au MEB permet d'observer une multitude de micro-cristaux de calcite ($< 12\mu\text{m}$) avec magnifiques mâcles de croissance; la taille et la texture viennent ainsi corroborer l'hypothèse de la priorité de la précipitation chimique sur les mécanismes d'apports clastiques et bioclastiques (Photos 1 - 2).

Des études ont démontré qu'une telle réaction chimique ne pouvait se dérouler qu'en conditions de sursaturation vis-à-vis de la calcite (Kelts and Heu, 1978). La précipitation carbonatée inorganique doit en effet vaincre l'obstacle initial de la nucléation. La réaction nécessite donc une grande concentration de calcium et de carbonates. Les ions de calcium aboutissent dans la masse aquatique par apports fluviaux ou souterrains et éventuellement par resuspension sédimentaire. Les anions de carbonates peuvent dériver directement de l'équilibre atmosphérique, de la respiration et de la réduction bactériologique de la matière organique.

Ces mécanismes limnologiques sont aptes à induire une sursaturation capable d'engendrer la précipitation minéralogique de la calcite: un facteur biologique agissant par assimilation photosynthétique du dioxyde de carbone et un facteur physico-chimique régissant les variations thermiques saisonnières responsables de la solubilité du CO_2 et de la calcite. Selon Stumm et Morgan (1970), la consommation algale de dioxyde de carbone s'approche de la relation stoechiométrique suivante:



Or, l'échange avec l'atmosphère étant comparativement beaucoup plus faible, la concentration du CO_2 diminue rapidement et cause une sursaturation carbonatée susceptible de former des micro-cristaux de calcite.

D'autre part, la température et les brassages de 2 masses d'eau conditionnent les réactions purement physico-chimiques de précipitation ou de solubilisation.

Dans le lac de Neuchâtel, il a été démontré que la combinaison des 2 facteurs conditionne la précipitation des carbonates de calcium (Portner, 1951). En effet, la concentration en gaz carbonique régit tout le système: son augmentation conduit à une élévation de la matière organique et à une diminution du CaCO_3 particulaire; sa diminution par assimilation phytoplanctonique favorise la formation minéralogique de la calcite. La précipitation du carbonate de calcium dépend donc uniquement de la saturation en gaz carbonique.

Conjointement à cette forte concentration estivale de calcite endogène, il est difficile d'estimer la proportion annuelle de carbonates bioclastiques et détritiques. D'après de nombreuses observations au MEB, elle doit cependant demeurer très modeste. En effet, peu d'organismes planctoniques lacustres sont capables de produire de la calcite (Kelts and Hsü, 1978). Seule l'algue verte "Phacotus" fait exception; elle est toutefois très rare dans les suspensions analysées. Par contre, la faune benthique, essentiellement littorale, pourrait contribuer à l'enrichissement des sédiments en carbonates de calcium. Leur transport hydrodynamique sous forme particulière reste cependant négligeable vis-à-vis de leur conservation sous forme bioclastique plus grossière (Kübler et al., 1979).

L'estimation de la calcite allogène est tout autant complexe. Une approche est envisageable en admettant que la dolomite soit totalement détritique. Le taux de calcite clastique serait alors fourni par leur rapport minéralogique (Kelts and Hsü, 1978). Il faudrait alors connaître leur rapport en période hivernale, lorsque la néoformation est nulle. Cependant, les moyens techniques utilisés ne permettent pas d'identifier avec suffisamment de netteté les traces de dolomites présentes. Il ne paraît donc pas judicieux de subdiviser la population carbonatée selon ce modèle.

Par contre, la meilleure approche demeure la visualisation cristallographique des particules au MEB; il se confirme alors qu'une très forte proportion de petits cristaux carbonatés présentent des faces de croissance polyédrales ou rhombiques typiques de néoformation endogène. Les grains mats, grossiers et arrondis par un transport fluvial sont très rares. Les micro-calcites en suspension dans le lac de Neuchâtel sont donc en forte majorité endogènes.

2. Les oxalates de calcium:

Ces composés sont présents sous 2 formes cristallographiques d'hydratation distinctes. Il y a la WHEWELLITE [$\text{Ca C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$] et la WEDDELLITE [$\text{Ca C}_2\text{O}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$]. Leur répartition est généralisée dans toute la masse aquatique du lac. Leur intensité mensuelle moyenne augmente fortement au début de l'été (juin - juillet), s'atténue déjà en août et ne subsiste que succinctement en automne. La distinction entre les 2 polymorphes paraît conditionnée par leur milieu (lac ou rivière) et par leur situation dans la colonne aquatique. La whewellite se concentre essentiellement parmi les particules en suspension dans le lac (Fig. 113) alors que la weddellite, plus rare, est principalement présente dans l'eau qui surnage à l'interface des sédiments (Fig. 114), à la surface du lac lors du bloom planctonique qui "rougit" l'eau (Fig. 115) et dans les rivières périlacustres. La coexistence des 2 minéraux dans un même échantillon est extrêmement rare; elle se présente parfois sur la Motte ou à proximité du fond du lac.

Discussion:

Les oxalates de calcium ont été rarement identifiés en milieux sédimentaires naturels. Pendant longtemps, l'intérêt de leur étude était focalisé sur la concentration importante qu'ils formaient dans les calculs rénaux (Prisen and Frondel, 1947; Gibson, 1974; Levinson et al., 1985). Conjointement au développement de ces connaissances, de nouvelles études cristallographiques (Sterling, 1965; Koutsoukos et al., 1980) et physico-chimiques (Rodgers and Garside, 1980; Tomazic and Nancollas, 1979) ont été réalisées pour soutenir les approches pathologiques qui conditionnent leur croissance dans les organes humains (Khan et al., 1979).

Les oxalates de calcium ont également été formellement identifiés et dosés dans plusieurs espèces biologiques depuis longtemps. Ils ont été reconnus dans divers champignons (Graustein et al., 1977), dans certaines plantes (Baker, 1952) et tiges de bois (Scurfield et al., 1973). De même, Griffin et al. (1984) citent différents travaux qui traitent de la cristallisation de la weddellite et de la whewellite dans de nombreuses plantes.

Dans les sédiments actuels, la weddellite a été reconnue pour la première fois dans sa localité-type, la mer de Weddell, entre 2425 et 2739 brasses (Bannister and Hey, 1936). Après avoir été longtemps mise en doute à cause de l'éventualité de sa cristallisation postérieure à l'échantillonnage (Hutton and Taft, 1965), elle a été formellement réhabilitée lorsque sa présence a été confirmée dans d'autres milieux similaires (Marlowe, 1970; Matsubara and Ichikura, 1975; Van der Lingen, 1979). Il y eut même la meilleure confirmation possible lorsque la weddellite fut à nouveau authentifiée avec certitude dans la mer de Weddell plus de 30 ans après sa première découverte par Bannister et Hey (Lowenstam, 1968). De plus, la weddellite a été fréquemment reconnue dans des sols (Graustein et al., 1977) et autres dépôts riches en matières organiques telles que des tourbes (Griffin et al., 1984).

L'éventualité d'une cristallisation après les prélèvements a été définitivement déniée de toute crédibilité par les travaux de Griffin, Sawyer et Melkote (1984). Afin d'obtenir une réponse irréfutable, ces auteurs ont multiplié les échantillonnages et les analyses sur les mêmes sites; ils ont aussi réalisé les déterminations minéralogiques le même jour que les prélèvements car la suspicion principale provenait de la durée de conservation des échantillons. Les résultats obtenus ainsi ont été rigoureusement identiques à ceux qui avaient été acquis sur du matériel stocké durant quelques mois en laboratoire.

Finalement, ils ont également disculpé l'emploi de l'eau oxygénée durant la préparation des échantillons. La weddellite existe indifféremment sur tous les préparats, qu'ils aient été ou non traités par H_2O_2 . Tout effet d'artefact semble donc inopérant sur la cristallisation des oxalates de calcium dihydratés.

La whewellite a été répertoriée dans diverses formations géologiques, toujours riches en carbonates et en matières

organiques (Pecora and Kerr, 1954; Leavens, 1968). Quelque soit leur degré d'hydratation, les oxalates de calcium peuvent donc exister dans les sédiments lacustres, fluviatiles et marins actuels.

Par contre, à notre connaissance, ils n'ont encore jamais été identifiés dans les suspensions d'un milieu aquatique avant leur découverte dans celles du lac de Neuchâtel et de ses affluents. Nous pensons toutefois que cette ignorance est due aux méthodes analytiques de la minéralogie, généralement peu adaptées aux faibles concentrations et de ce fait rarement appliquées aux études des suspensions marines. D'ailleurs, dans les sédiments eux-mêmes, la reconnaissance des oxalates de calcium n'est pas aisée car leur concentration ne représente qu'une très faible proportion du matériel et leurs caractéristiques minéralogiques (indices de réfraction, pics de diffraction) et cristallographiques (bipyramides) peuvent aisément les confondre avec d'autres espèces (Van der Lingen, 1979). Ainsi, selon divers auteurs (Griffin et al., 1984; Van der Lingen, 1979), la weddellite existe certainement beaucoup plus souvent qu'elle a été répertoriée et constituerait même un minéral authigène commun de nombreux sédiments. Seules les difficultés de détermination émises précédemment la rendent encore aléatoire.

A la suite de toutes ces observations, aucune restriction majeure ne pourrait s'opposer à la présence des oxalates dans les MES du lac de Neuchâtel. La concentration de la weddellite dans les rivières s'accorde parfaitement avec les résultats de Marlowe (1970). La présence d'un environnement alcalin nécessaire à leur stabilité et à leur conservation (Marlowe, 1970; Pecora and Kerr, 1954) est également satisfaisante. Seul le problème de leur origine précise, maintes fois discuté, reste à élucider.

Il est aujourd'hui acquis que la concentration des oxalates de calcium dépend directement de la quantité de matière organique (Griffin et al., 1984). Il est également certain que des cristaux de whewellite et de weddellite peuvent exister simultanément à l'acide oxalique dans plusieurs types d'espèces biologiques. Ainsi, l'accumulation de plantes, de tiges de bois, de feuilles et autres produits de dégradation organique dans les couches sédimentaires permet de concentrer des oxalates de calcium solides ou dissous; cette dernière forme étant susceptible de précipiter dans l'eau interstitielle (Marlowe, 1970; Van der Lingen, 1979). A côté de cette précipitation géochimique ou d'une croissance "biologique", les cristaux d'oxalate de calcium peuvent provenir de la biominéralisation des matières organiques par activité bactériologique (Lowenstam, 1981).

Cependant, à l'état actuel de nos investigations, l'origine de la whewellite et de la weddellite en suspension dans les eaux du lac de Neuchâtel et de ses affluents ne peut être formulée avec certitude. Seules les hypothèses suivantes peuvent être émises: la weddellite existe essentiellement dans les couches limniques profondes et dans les rivières; elle proviendrait alors de la précipitation de l'acide oxalique dans l'eau interstitielle des sédiments superficiels grâce aux apports de la biomasse. Cette éventualité s'accorderait avec les conclusions de Marlowe (1970) et de Van der Lingen (1979) qui ont identifié de la

weddellita authigène dans les dépôts de 2 fleuves canadiens et de la mer de Corail. Sa présence parmi les MES résulterait alors de sa remise en suspension par les courants fluviaux ou par des courants limniques de fond.

Quant aux whewellite, essentiellement pélagiques, elles proviendraient soit d'une néoformation par biominéralisation bactériologique in situ des particules organiques en décomposition dans la colonne aquatique (Lowenstam, 1981), soit simplement de la conservation des cristaux formés dans les espèces biologiques autochtones ou allochtones. L'évolution annuelle de leur concentration avec une intensification estivale très marquée tendrait à leur attribuer une origine de néoformation bactériologique plutôt qu'une origine biologique intrinsèque, sans preuves formelles toutefois.

3. Les phosphates de calcium:

Des cristaux d'hydroxy-orthophosphates de calcium apparaissent régulièrement dans les suspensions printanières et estivales du lac. Ils sont par contre absents dans tous les affluents. Leur concentration maximale atteint son apogée lors de l'échantillonnage mensuel de juin. Cette forte intensité, déjà amorcée en mai, se poursuit jusqu'en juillet. Dès le mois d'août, leur persistance s'atténue jusqu'à l'aube de l'hiver qui les voit pratiquement disparaître en novembre et décembre. En mars 1985, leur disparition est totale. Selon les analyses minéralogiques par diffraction des RX, ces cristaux s'identifient à de l'HYDROXY-APATITE [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$]. Les pics de diffraction répertoriés sur les échantillons des MES (Fig. 116) s'apparentent en effet parfaitement aux principaux pics définis sur la carte PDF 9-432 (Tableau 11).

L'observation des spectres de tous les échantillons dévoile 2 états de cristallisation bien distincts. L'hydroxy-apatite apparaît tantôt sous une forme cristalline parfaite (Fig. 116), tantôt, et le plus souvent, dans un état intermédiaire entre les phases amorphes et cristallines (Fig. 117). Les particules qui contribuent à l'excellente cristallisation observée sur les spectres d'analyse appartiennent à la couche benthique (Fig. 118) ou à la station de pompage de Portalban (Fig. 116). C'est d'ailleurs à 1 m du fond que les variations qualitatives et quantitatives de l'hydroxy-apatite sont les plus intenses, tandis qu'une plus grande homogénéité règne dans la masse aquatique sous-jacente.

TABLEAU 11: Pics principaux d'un spectre de diffraction d'une hydroxy-apatite en suspension dans le lac de Neuchâtel (MES) comparés à ceux qui sont définis par la carte PDF 9-432 (PDF):

Intensité	d (Å)-MES	d (Å)-PDF
12	8.17	8.17
10	-	4.07
10	3.88	3.88
40	3.44	3.44
12	3.17	3.17
18	3.09	3.08
100	2.822	2.814
60	2.779	2.778
60	2.734	2.720
25	2.629	2.631
20	2.270	2.262

Conjointement aux analyses minéralogiques, des investigations ont été entreprises au MEB relié à une microsonde à énergie dispersive (EDX) pour confirmer l'existence des hydroxy-apatites et pour observer leur morphologie granulaire. En-dehors des pollutions de silicium, l'analyse chimique semi-quantitative des éléments majeurs ne révèle que la présence de Calcium et de Phosphore (Fig. 119); ce sont bien les seules composantes majeures des phosphates de calcium hydratés. L'observation des particules au MEB est également de grand intérêt. Les hydroxy-apatites ressemblent à des "plaquettes" polygonales proches de 20 μm de côté et d'une épaisseur inférieure à 5 μm (Photo 3). Un examen plus attentif permet de déceler qu'il s'agit en fait de l'assemblage latéral d'une multitude de micro-cristaux dont la longueur équivaut à l'épaisseur de la plaquette constitutive (Photo 4). Certains endroits présentent même une deuxième couche de cristaux créés par un "bourgeonnement" cristallin au-dessus de la plage précédente (Photo 5).

Au cours d'une campagne préliminaire, en octobre 1983, des traces de VIVIANITE $[\text{Fe}_3 (\text{PO}_4)_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}]$ ont été répertoriées dans les suspensions des eaux prélevées aux stations de pompage de Cudrefin et Portelben (Fig. 120). Malgré leur identification irréfutable à cette époque, elles n'ont plus jamais pu être identifiées clairement lors des campagnes ultérieures.

Discussion:

Similairement à sa présence dans certaines formations géologiques, le phosphore intervient dans de nombreux processus authigènes des sédiments lacustres actuels. Bien qu'il soit considéré comme un élément mineur de la chimie lacustre avec ses concentrations très faibles (0.25 à 0.75 % du poids sédimentaire sec), il joue un rôle primordial dans le développement des populations planctoniques et conditionne leur relation avec les phénomènes d'eutrophisation. Une abondante littérature, encore loin d'être achevée, a été nourrie par l'étude des interactions entre la phase dissoute et la phase particulaire du phosphore, par l'évolution saisonnière et bathymétrique de ces relations et par les transferts qu'il peut organiser entre diverses formes chimiques (phosphore organique, phosphore inorganique apatitique et phosphore inorganique non apatitique). Il semble que toutes les recherches actuelles intéressées par la compréhension des mécanismes qui régissent la précipitation des phosphates se regroupent sur 2 axes principaux: (1) celui de la précipitation chimique directe et (2) celui de la biominéralisation par activité bactériologique. Il s'avère cependant que des expériences récentes peuvent démontrer que les 2 mécanismes sont généralement intimement liés (3) (Lucas et Prévôt, 1984).

(1): Dans leur brève synthèse consacrée à la minéralogie des phosphates des sédiments lacustres actuels, Jones et Bowser (1978) résument le cheminement des études axées sur la précipitation chimique directe et relèvent la complexité d'une transposition des expériences de laboratoire en milieu naturel. Quelque soient les caractéristiques chimiques du milieu approché (sédiments diversément calcaires, conditions euxiques ou anoxiques), le phosphore peut exister sous toutes ses formes; son environnement favorisera toutefois certaines réactions au détriment des autres. Ainsi, les orthophosphates inorganiques non apatitiques pourraient tantôt se fixer sur des oxydes et hydroxydes ou sur des fractions non cristallines (Williams et al., 1971; 1976), tantôt précipiter sous forme d'hydroxy-apatites ou autres espèces apatitiques cryptocristallines (Williams and Mayer, 1972; Nriagu and Dell, 1974), tantôt coprecipiter avec des carbonates (Otsuki and Wetzal, 1972). Selon ces derniers auteurs, dans un lac alcalin fortement calcaire, les phosphates peuvent s'incorporer dans les particules carbonatées précipitées lors d'une nette élévation du PH causée par l'absorption photosynthétique du CO_2 . La coprecipitation se produirait soit par adsorption du micro-composant par le minéral principal, soit par formation de cristaux mixtes. L'expérience a été conduite sur les eaux du lac Lawrence (Michigan), très riches en calcium (63.3 mg/l) et en magnésium (29.3 mg/l). Après un faible ajout de phosphates (PO_4^{3-}), une période d'incubation, une variation de température et un réajustement du PH, une grande partie du phosphate précipite avec les carbonates. L'élévation du PH constitue le facteur principal dans l'élaboration de la cristallisation. D'après les caractéristiques de cette réaction, les phosphates seraient incorporés aux cristaux de calcite. Toutefois, même si le PH d'un milieu lacustre peut fortement augmenter par la

photosynthèse phytoplanctonique, la simple transposition de telles expériences en domaine naturel demeurerait fort hasardeuse, essentiellement à cause de la méconnaissance des effets des acides organiques dissous.

Dans une expérience comparable, Avnimelech (1983) a pu observer la cristallisation surfacique de composés phosphatés sur des particules carbonatées prélevées dans les eaux du lac Kinneret, dont les caractéristiques alcalines et carbonatées s'approchent de celles du lac de Neuchâtel. Ces composés ne constitueraient pas vraiment des cristaux mais plutôt des surfaces complexes de $\text{Ca}_3(\text{HCO}_3)_3\text{PO}_4$ souvent mal cristallisées et transformées ultérieurement en apatites cristallines. Selon cet auteur, divers travaux auraient démontré l'existence commune de ces cristaux mixtes ou surfaces complexes de phosphate dans de nombreux lacs. La cristallisation épitaxiale d'hydroxy-apatite a également été réalisée sur une autre phase minérale composée d'oxalate de calcium (Koutsoukos et al., 1980). Toutefois, cette croissance minéralogique ne serait induite que sur l'oxalate de calcium trihydraté; elle n'apparaîtrait pas du tout sur les formes mono- (Whewellite) et di-hydratées (Weddellite). Cette expérience a également permis de photographier de magnifiques micro-cristaux d'hydroxy-apatite en germes ou en croissance sur l'oxalate de calcium.

Norvell (1974) a conduit des expériences similaires sur des échantillons de sédiment prélevés dans un lac anoxique et conservés dans des conditions identiques. Il a pu observer une corrélation linéaire entre l'insolubilisation des phosphates et la diminution de la somme des cations solubles. De plus, la diminution des cations divalents ($\text{Mn} - \text{Fe} - \text{Ca} - \text{Mg}$) surpasserait nettement celle des ions monovalents ($\text{Na} - \text{K} - \text{NH}_4$) et s'opposerait à une légère augmentation du Si. En conséquence, et en se basant sur les capacités d'échange cationique, l'auteur suggère que la précipitation phosphatée directe dépasserait nettement la création de nouveaux échanges avec formation de cristaux mixtes. En se basant sur la comparaison des produits de solubilité des composés phosphatés connus avec ceux des solutions interstitielles échantillonnées, il a pu reconnaître la forme minérale de quelques espèces compatibles, telles que la vivianite, l'hydroxy-apatite et le calcium triphosphaté $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]$. Selon lui, ces 2 derniers minéraux pourraient même constituer un facteur limitatif du phosphore organique dans les sédiments anoxiques d'un lac.

(2): L'importance de l'activité bactériologique est actuellement reconnue dans les processus géochimiques naturels (Hanselmann, 1986). Les microbes affectent indirectement toutes les réactions de précipitation et dissolution, d'adsorption et désorption, d'oxydation et réduction, etc. Diverses études ont montré le rôle primordial que les bactéries peuvent jouer dans les mécanismes de dégradation du phosphore organique et dans la sédimentation ou le relargage des phosphates (Gächter and Mares, 1985; Avnimelech, 1983; Lowenstam, 1981).

Cependant, l'intervention des bactéries se répercute déjà sur le comportement de l'évolution annuelle de la

concentration du phosphore particulaire dans la colonne d'eau. En effet, le rapport C/P (Carbone/Phosphore) de la biomasse particulaire peut considérablement s'écarter de la valeur théorique de 106 établie par Redfield et al. (1963) suivant la profondeur, la saison ou l'état trophique des eaux (Gächter and Mares, 1985; Gächter and Bloesch, 1986).

En surface, le phosphore est abondamment assimilé lors du développement printanier et estival des populations phytoplanctoniques. Toutefois, bien que le phosphore devienne ainsi un facteur limitant, la croissance des algues persiste, à une vitesse réduite certes. La composition bioparticulaire s'enrichit alors en carbone aux dépens du phosphore et provoque ainsi une forte majoration du rapport C:P au-delà de 106. La diminution verticale de ce rapport peut s'expliquer par la conjugaison de 2 mécanismes chimiques simultanés: l'atténuation du carbone organique dans l'ensemble sestonique par sa minéralisation et l'augmentation du phosphore particulaire durant la décantation des composés solides en décomposition (Gächter and Mares, 1985).

Il a en effet été démontré que non seulement la minéralisation de ces particules ne produisait pas de phosphore soluble, mais qu'au contraire elle en consommait par adsorption physico-chimique ou précipitation, ou encore par l'activité colonisatrice des bactéries sur les détritiques (Currie and Kalff, 1984; Gächter and Mares, 1985). La concentration du phosphore particulaire augmente donc avec la profondeur d'eau, s'intensifie à l'interface sédimentaire et atteint son maximum dans la couche centimétrique oxydée des dépôts superficiels (Bloesch, 1974; Gächter and Mares, 1985). Par contre, cette concentration s'atténue fortement avec la profondeur d'enfouissement du sédiment à partir de l'instauration du milieu réducteur.

Bien que les mécanismes de fixation du phosphore soluble sur les particules soient très complexes, il semble bien que conjointement aux processus physico-chimiques tels qu'adsorption sur des surfaces cristallines ou précipitation, son absorption par les algues en suspension ou par les microorganismes et les bactéries colonisant le matériel en décantation puisse être très importante (Paerl, 1975; Barsdate et al., 1974). Ailleurs, il a été démontré que l'augmentation de la concentration des phosphates pouvait activer la décomposition et la minéralisation d'organismes par son influence bénéfique sur l'activité microbienne (Sherr et al., 1982). Les bactéries seraient même capables d'entrer en compétition avec les algues planctoniques lors de l'absorption de phosphore soluble, essentiellement lorsque celui-ci se trouve dans de faibles concentrations (Lean and White, 1983; Currie and Kalff, 1984).

(3): L'augmentation verticale de la fixation du phosphore soluble dans la colonne d'eau et sa poursuite à la surface sédimentaire repoussent aux couches anoxiques inférieures la possibilité de trouver une source pour les phosphates benthiques solubles. La phosphatogénèse se produirait alors au sein de la vase superficielle fortement organique, avant que le sédiment ne soit enfoui, dans des conditions

aérobiques (Lucas et Prévôt, 1984). Selon les observations de laboratoire de ces derniers auteurs, il n'y aurait aucune précipitation phosphatée en milieu anaérobie et une inertie totale dans des préparations stérilisées. L'intervention des bactéries apparaît donc déterminante dans les processus qui conduisent à la synthèse apatitique. Leur rôle est encore confirmé par le temps de latence observé avant l'apparition des premières traces d'apatite qui serait nécessaire au développement d'une population bactérienne à partir des éléments en solution. Il apparaît de plus en plus que toute précipitation phosphatée nécessite des mécanismes biologiques largement plus importants que les processus purement physico-chimiques qui interviendraient ultérieurement lors de la néocrystallisation (Gächter and Mares, 1985).

Conclusion:

La brève synthèse des travaux cités précédemment ne prétend pas apporter de solution claire à la présence d'hydroxy-apatites dans le lac de Neuchâtel. Toutefois, elle permet de démontrer les problèmes inhérents à de telles particules et de situer l'éventail des processus plausibles à leur formation. Bien que l'observation au microscope électronique à balayage révèle que leur précipitation néocrystalline est fort plausible, des interrogations demeurent sur le lieu, le temps et la durée de la réaction. D'après diverses études (Lucas et Prévôt, 1984; Gächter and Mares, 1985), la phosphatogenèse pourrait se dérouler dans la couche oxydée du sédiment superficiel, en milieu aérobie. Elle ne constituerait alors que le prolongement des processus bactériens amorcés dans la colonne d'eau. La présence de ces particules parmi les MES devraient toutefois recourir à des mécanismes de remise en suspension qui nous paraissent nécessiter des courants trop importants. C'est pourquoi nous formulons l'hypothèse d'une précipitation phosphatée endogène conditionnée par une concentration artificielle engendrée par les stations d'épuration. Tant le P que le Ca seraient suffisamment abondants; dès l'instauration de conditions aérobes, en milieu lacustre, la formation pourrait s'amorcer grâce à l'activité des microorganismes bactériens. Des mécanismes plus purement physico-chimiques achèveraient le transfert phosphorique vers les particules par précipitation ou par adsorption éventuelle sur des cristaux de carbonates ou d'oxalates de calcium (Otsuki and Wetzel, 1972; Avnimelech, 1983; Koutsukos et al., 1980), tous abondants dans le lac de Neuchâtel.

Quant à la présence sporadique de vivianite en suspension vers la fin de la période de stratification thermique, elle pourrait plus aisément provenir d'une resuspension sédimentaire locale. Les conditions de sa précipitation définies par Nriagu et Dell (1974) montrent qu'en effet la vivianite est formée au cours de la diagenèse précocée du sédiment et qu'elle est probablement l'un des minéraux phosphatés les plus stables en milieu réducteur. Des études réalisées sur les sédiments du lac Majeur (Viel, 1983) ont confirmé ces caractéristiques pour l'environnement des

mécanismes de cristallisation de la vivianite. Elles ont également démontré que les processus d'oxydation qui interviennent après l'échantillonnage peuvent lui causer une rapide et intense altération.

La reconnaissance de telles particules en suspension dans le lac tend à confirmer l'existence de courants limniques capables de procurer une resuspension des sédiments d'interface et de sa sous-couche réduite. La sporadicité et la faiblesse de leur présence s'expliqueraient par l'effet conjugué de 2 processus chimiques typiques de ce lac. Tout d'abord, la géochimie sédimentaire du milieu riche en carbonate de calcium et relativement pauvre en fer par rapport au soufre ne favorise guère la précipitation minéralogique de la vivianite (Nriagu and Dell, 1974). Ensuite, les conditions aérobiques de la colonne aquatique atténueraient le temps de conservation des particules qui auraient pu se former. La probabilité d'échantillonnage de la vivianite deviendrait alors très restreinte.

4. Les sulfates et les formates de calcium.

Le GYPSE ($\text{Ca SO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) et l'ANHYDRITE (Ca SO_4) peuvent exister en suspension dans les couches benthiques du lac et surtout dans ses affluents. Les plus fortes concentrations ont été répertoriées dans les rivières périlacustres et dans l'émissaire de la Thielle, essentiellement de mai à août 1984. Dans le lac proprement dit, du sulfate de calcium en suspension a été observé uniquement en juillet et à proximité du fond des 4 stations mensuelles. Le gypse apparaît aussi régulièrement dans l'eau surnageante ou à l'interface sédimentaire oxydée de la plupart des prélèvements récoltés par un carottier sur l'ensemble de la surface du lac (Fig. 9). Il est généralement accompagné d'un autre minéral bien cristallisé qui disparaît après un chauffage à 500°C . Il se répertorie non seulement très bien sur des préparations orientées, mais également sur les poudres de sédiment total. D'après les caractéristiques cristallographiques qu'il révèle par l'analyse aux RX, il s'agirait d'un FORMATE de CALCIUM [$\text{Ca} (\text{CHO}_2)_2$]. L'association de ces 2 minéraux, située à l'interface des sédiments, se répartit sur la zone du haut-lac et celle de la plaine profonde du SW de la Motte. Tous deux peuvent manifester une intensité minéralogique tout à fait remarquable (Fig. 121).

Discussion:

Il paraît vraisemblable que la coexistence des sulfates et des formates de calcium observés à l'interface sédimentaire du fond du lac provienne d'un même processus physico-chimique. Par contre, le gypse en suspension dans les rivières aurait une source différente. L'origine des sulfates de calcium de la couche superficielle des dépôts lacustres peut paraître à priori fort suspecte. Toutefois, l'interface eau-sédiments constitue un milieu si complexe, et encore mal connu, qui pourrait éventuellement réunir les conditions physico-chimiques propices à la précipitation des

ions de Ca^{2+} et de SO_4^{2-} . Les cations de calcium sont très abondants dans un lac alcalin. Ils ne constitueront donc certainement pas une limitation à la formation des sulfates de calcium. Par contre, les eaux douces sont pauvres en SO_4^{2-} ; leur concentration est voisine de 12 mg/l dans le lac de Neuchâtel. Le soufre peut toutefois provenir d'autres sources et enrichir les couches benthiques en sulfates après avoir subi plusieurs transformations chimiques et bactériologiques. Il constitue en effet 0.1 à 2.0 % du poids sec de la biomasse des organismes vivants (Jørgensen; in Krumbein, 1983). Il peut être assimilé par des bactéries aussi bien que par les algues et les plantes aquatiques sous forme de sulfates. A leur mort, tous ces organismes vont tomber au fond du lac et constituer la fraction organique autochtone du sédiment. Dans le lac de Neuchâtel, celle-ci supplante nettement la proportion qui provient des apports organiques allochtones (Beck, 1987). La composition générale de la matière organique des sédiments s'apparentent alors globalement et dans une première approximation à celle qui a été fournie par Redfield (1958):

(CH₂O)106 (NH₃)16 (H₃PO₄)1

a) La réduction des sulfates.

Les dépôts accumulés au fond du lac subissent alors une décomposition bactériologique essentiellement anaérobie; il y aura une production de sulfures si la respiration est sulfatée et une formation de méthane lors d'oxydation. Ce dernier mécanisme est très fréquent dans les lacs. Les réactions respectives sont les suivantes (Krumbein and Swart, 1983):

(CH₂O)106 (NH₃)16 (H₃PO₄) + 53 SO₄²⁻ ---->
106 CO₂ + 16 NH₃ + H₃PO₄ + 53 S⁻ + 106 H₂O

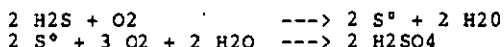
(CH₂O)106 (NH₃)16 (H₃PO₄) ---->
53 CO₂ + 53 CH₄ + 16 NH₃ + H₃PO₄ + 106 H₂O

La réduction sulfatée est importante en milieu océanique; elle pourrait également être intense dans un milieu fortement perturbé par diverses activités anthropiques qui engendrent des concentrations artificielles de sulfates. Dans le lac, la deuxième réaction est certainement prépondérante (Krumbein and Swart, 1983). Le méthane ne serait toutefois pas nécessairement un produit terminal de dégradation; il pourrait migrer en zone aérobie et s'oxyder (Krumbein and Swart, 1983). Il passerait par différentes formes telles que le méthanol, le formaldéhyde, les formates, bicarbonates et carbonates. Selon les conditions physico-chimiques de l'interface sédimentaire, la concentration et les caractéristiques électrochimiques des éléments constitutifs, l'oxydation du méthane pourrait momentanément engendrer divers cristaux tels que les formates et les carbonates de calcium. D'après des études récentes (Reeburgh, 1982), il semble même que le méthane puisse s'oxyder en demeurant dans un milieu réducteur. La réaction serait due à une activité biologique associée à la

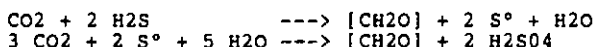
réduction des sulfates. Ainsi, un cycle complet du carbone pourrait s'opérer et conduire à une reminéralisation vers des composés carbonés même dans des conditions anaérobiques. La réduction des sulfates s'opère très rapidement dans les sédiments lacustres. Elle est favorisée par le développement bactériologique des *Desulfovibrio* et des *Desulfotomaculum*. Les sulfates sont alors relayés par l'amplification verticale du méthane (Jørgensen, 1983).

b) L'oxydation des sulfures sédimentaires:

Au-dessous de la micro-couche oxydée, les dépôts sédimentaires aquatiques renferment tous divers sulfures [H_2S ; CH_3SH ; $(\text{CH}_3)_2\text{S}$]. D'après Jørgensen (1983), leur oxydation en SO_4^{2-} peut régulièrement s'opérer grâce à l'activité de 2 groupes physiologiques de bactéries. Il y a tout d'abord celles qui agissent sans lumière et en consommant de l'oxygène, telles que les *thiobacilli* et les *beggiatox*. Le soufre est alors oxydé selon la stoechiométrie générale suivante:



Le deuxième groupe physiologique est caractérisé par des bactéries phototrophes qui oxydent le soufre en assimilant du CO_2 en présence de lumière. La réaction se déroule sans oxygène:



Jørgensen (1983) décrit l'évolution de ces processus bactériologiques qui se déroulent dans les sédiments marins et lacustres pour aboutir à la formation de sulfates. Il propose finalement un modèle sur le cycle complexe du soufre à l'interface des dépôts marins côtiers. Selon lui, seule une très faible fraction de sulfures proviendrait de la décomposition de la matière organique. La majeure partie résulterait de la réduction des sulfates d'interface dont l'existence serait elle-même causée par la réoxydation des sulfures sédimentaires. Ce cycle continu atténuerait la précipitation des sulfates au détriment des sulfures (pyrites). Il donnerait ainsi une explication à la prépondérance des sulfures qui existent toujours dans les sédiments malgré la très faible part de soufre qu'ils peuvent fixer.

c) Conclusion:

Les diverses espèces de *thiobacilli* et de *beggiatox* qui participent au cycle du soufre existent abondamment dans tous les lacs (Jørgensen; in Krumbein, 1983; Hanselmann, 1986). Elles seraient donc tout à fait susceptibles d'intervenir dans la formation des sulfates de calcium des

couches benthiques du lac de Neuchâtel. A la suite de leur oxydation, les sulfates plongés dans un milieu très riche en calcium pourraient alors précipiter momentanément sous forme de gypse. La chaîne d'oxydation du méthane qui se produit conjointement à celle des sulfures conditionnent la précipitation momentanée des formates de calcium qui l'accompagnent généralement.

En milieu fluviatile, par contre, ce serait l'intervention des bactéries phototrophes qui pourraient produire l'oxydation des sulfates dans des zones provisoirement calmes et confinées ou alors simplement dans les stations de traitement des eaux qui se déversent ultérieurement dans les rivières.

C. Les particules d'origine essentiellement biologique

Certains organismes planctoniques peuvent produire des tests qui se dispersent parmi les suspensions d'un milieu aquatique. Les groupes susceptibles de former des coquilles ou des squelettes calcaires sont extrêmement rares dans les lacs. La seule exception importante est représentée par l'algue verte du genre *Phacotus*. Elle n'est toutefois apparue que très rarement dans les suspensions observées au MEB. Par contre, les populations de diatomées (algues à kyate siliceux) abondent durant la période de productivité biologique du lac. Elles présentent des proliférations périodiques plus accentuées lors du premier développement printanier et vers la fin de l'été (Wüthrich, 1965). Le rythme de cette alternance d'intensité diatomique dépend des conditions physico-chimiques de l'eau et du développement des autres espèces planctoniques; comme dans les Grands Lacs (Schelske et al., 1983), il est certainement aussi influencé par l'évolution de la concentration de la silice et du phosphore épilimniques qui constituent des facteurs limitants lors de proliférations phytoplanctoniques exagérées. En 1965, Wüthrich avait déterminé toutes les espèces de diatomées du lac de Neuchâtel, leur évolution spatio-temporelle, leur relation avec les autres groupes planctoniques et leur variation depuis le début du siècle. Actuellement, Straub (1984; thèse en prép.) décrit les espèces du périphyton épilithique et épiphytique littoral de divers lacs jurassiens et du lac de Neuchâtel. Dans notre approche, il n'était pas envisageable de réaliser une étude taxonomique complète des diatomées, ni de quantifier rigoureusement leur évolution annuelle. Dans notre cadre, elles ne constituent qu'une fraction, certes parfois importante (Photo 6), de la masse particulaire minérale en suspension. En tant que composante essentielle de la phase phytoplanctonique, les diatomées sont toutefois capitales car elles vont régir les conditions physico-chimiques de l'épilimnium qui peuvent auquer d'autres précipitations minéralogiques telles que la cristallisation des carbonates.

Sur les échantillons observés au MEB, diverses espèces ont pu être déterminées. Cependant, il faut d'emblée signaler que grâce aux nouvelles performances apportées par cet appareil, certaines formes abondantes attribuées autrefois à

une espèce sont maintenant transférées dans une autre espèce (Straub, com. pers.). Ces données nouvelles, ajoutées à l'évolution de l'état trophique du lac, perturbent alors considérablement les rapports de densité et de fréquence des espèces déterminées par Wüthrich (1965). Ainsi, Stephanodiscus Hantzschii Grunow, que l'on croyait très abondant, n'a pas été retrouvé. Par contre, deux petites espèces de ce genre, caractéristiques de lacs eutrophes, apparaissent en masse; il s'agit de Stephanodiscus minutulus (Kütz.) Round et de Stephanodiscus parvus Stoermer et Håkansson. Parmi les espèces rencontrées, nous citerons (identification par F. Straub):

- Fragilaria crotonensis, Kitton (Ph. 7)
- Stephanodiscus neoastreae, Håk. et Hickel (Ph. 8)
- Stephanodiscus parvus, Stoermer et Håk.
- Stephanodiscus minutulus (Kz.) Round
- Cyclotella atomus, Hust.
- Melosira islandica asp. helvetica, O. Müll.
- Asterionella formosa, Haasal
- Diatoma vulgare, Bory
- Synedra acus, Kütz.
- Tabellaria fenestra (Lyngh.) Kütz.
- Navicula viridula var. rostellata (Kütz.) Cl. (Ph. 9)
- Navicula schoenfeldii, Hustedt
- Navicula cf cincta (Ehr.) Kütz.
- Cymatopleura solea (Bréb.) Smith.
- Cocconeis pediculus Kütz. (Ph. 10)

D. Particularités minéralogiques des matières en suspension prélevées par collecteurs de sédiments.

Le système de prélèvement des particules en suspension peut considérablement influencer sur la nature quantitative et qualitative des échantillons. Il a déjà été démontré (chap. V) que les caractéristiques granulométriques d'une population particulière récoltée instantanément sur un point fixe (par filtration d'un volume d'eau récolté avec une bouteille océanographique) diffèrent notablement de celle qui s'accumule par décantation dans un collecteur durant une période de plusieurs jours. Il s'avère cependant que ces différences granulométriques résultent d'une

LEGENOE DES PHOTOS

PHOTOS 1-2: Microcristaux de calcite néoformée, 4 Juillet 1984.

PHOTO 3: Ensemble de "plaquettes" d'hydroxyapatite, 4 juillet 1984.

PHOTO 4: Assemblage de microcristaux d'hydroxyapatite, constitutifs des plaquettes, 4 juillet 1984.

PHOTO 5: Cristallisation d'hydroxyapatite, Mai 1984.

PHOTO 6: Population diatomique, Avril 1984, Portalban, - 40 m.

- Stephanodiscus neastrea, H&K. et Hickel
- Stephanodiscus parvus, Stoermer et H&K.
- Asterionella formosa, Hassal
- Melosira sp.

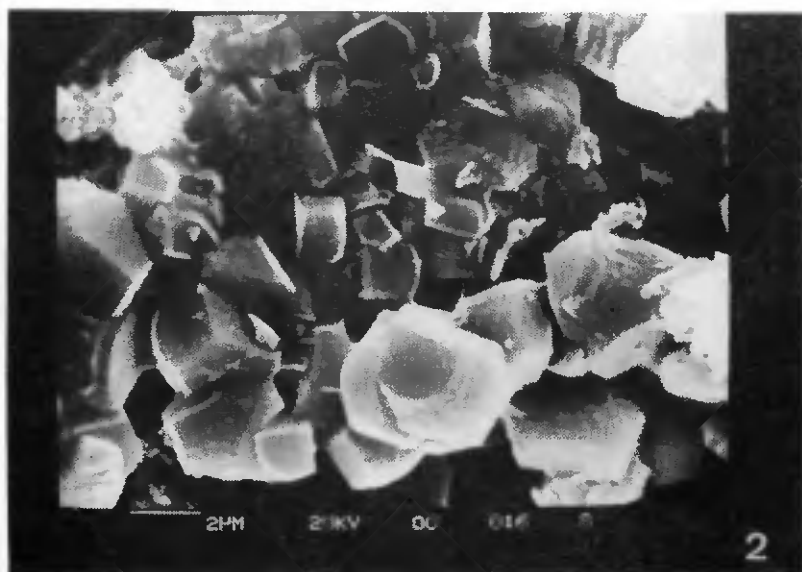
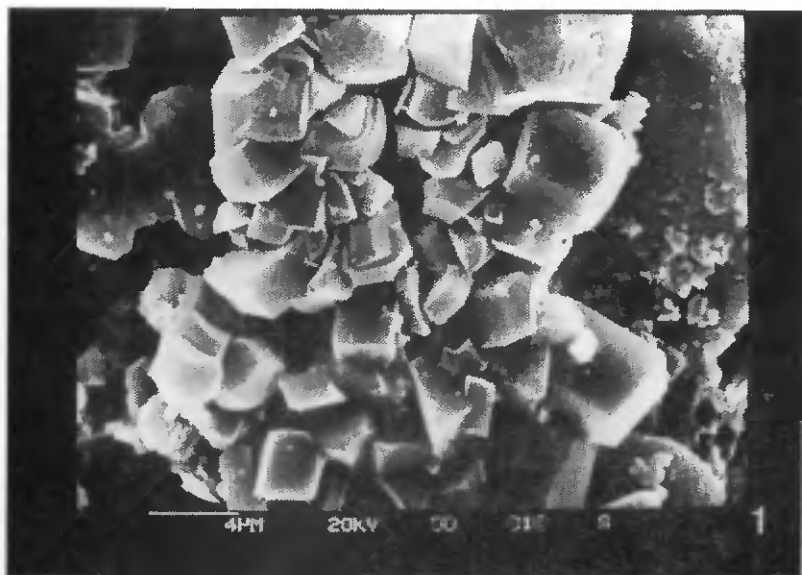
PHOTO 7: Fragilaria crotonensis, Kitton; octobre 1983, - 40 m.

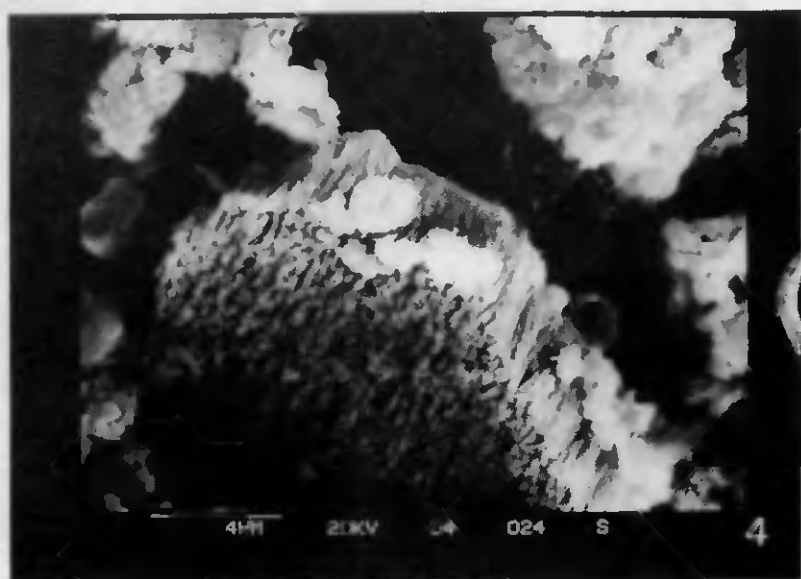
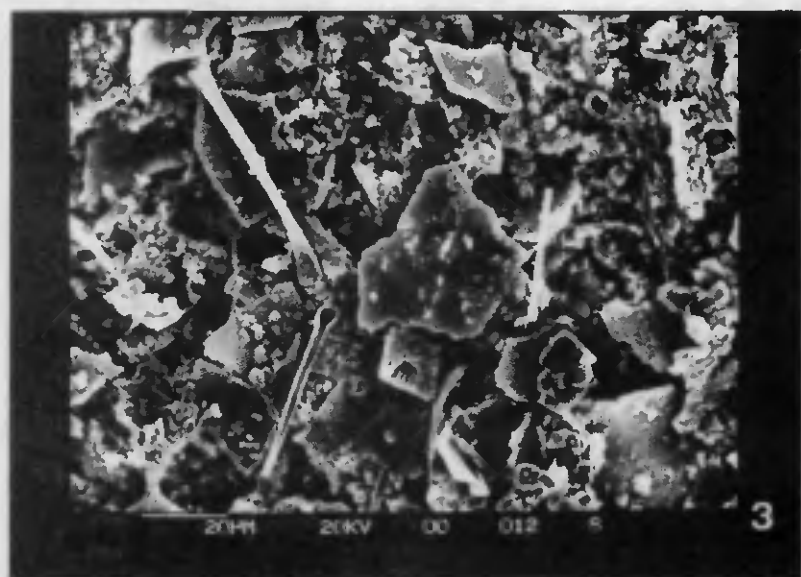
PHOTO 8: Stephanodiscus neastrea, H&K. et Hickal

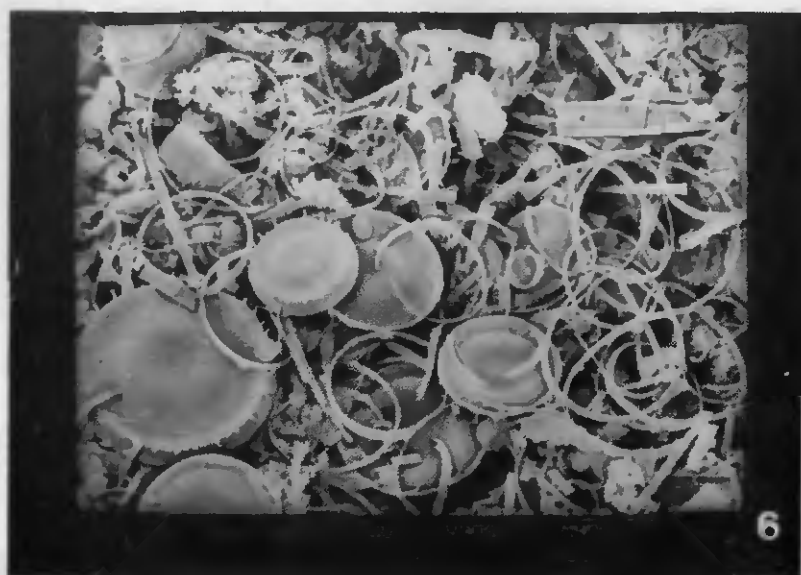
PHOTO 9: Navicula viridula var. rostellata (Kütz.) Cl.

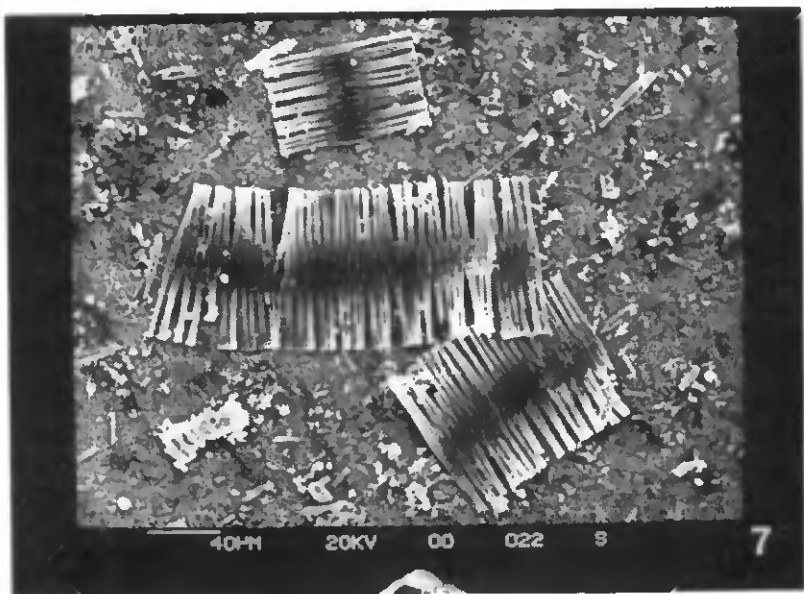
PHOTO 10: Cocconeis pediculus, Kütz.

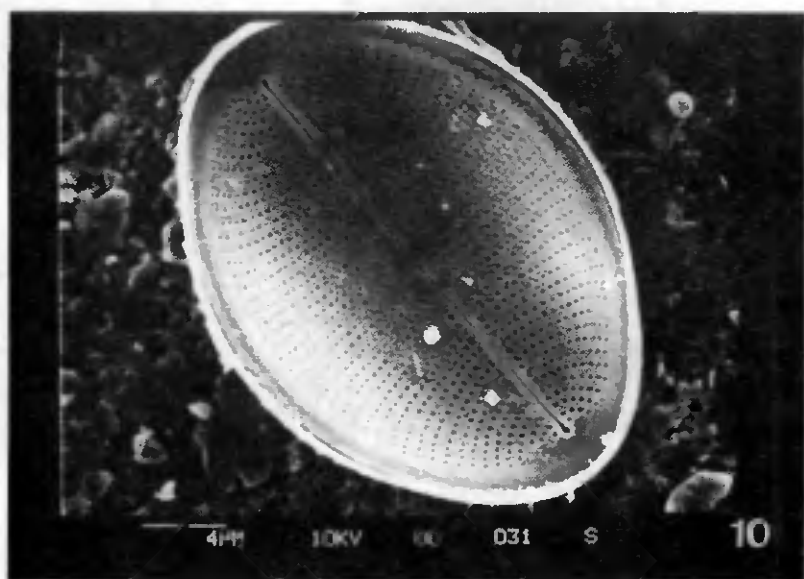
(Détermination des diatomées: F. STRAUB, cité en bibliographie).











constitution minéralogique distincte, elle-même conditionnée par l'hydrodynamisme de l'ensemble particulaire. En effet, durant une période saisonnière similaire, le rapport entre la concentration des minéraux argileux et celle des carbonates et des silicates est beaucoup plus faible dans les pièges que sur les filtres prélevés ponctuellement. L'analyse minéralogique permet donc d'identifier la nature des particules qui engendrent les variations granulométriques tributaires du mode d'échantillonnage.

Au printemps, les dépôts particuliers accumulés dans les collecteurs renferment énormément de calcite et une petite fraction quartzitique (Fig. 122). Durant la première période d'exposition des pièges (25.04. - 20.05.86), le rapport d'intensité des pics de diffraction entre la calcite (102) et le quartz (101) vaut approximativement 4 à toutes les profondeurs. Il s'élève à 6 durant la deuxième période (20.05 - 29.05.86). Les minéraux argileux fins n'apparaissent pratiquement pas. Durant la troisième période d'exposition (03.10 - 28.10.86), au contraire, ce même rapport minéralogique s'abaisse aux environs de 0.5. L'intensification du quartz s'accompagne également d'une concentration non négligeable de minéraux détritiques tels que la chlorite, le mica, les plagioclases, les feldspaths potassiques et la dolomite (Fig. 123).

Discussion:

La détermination minéralogique des particules permet de confirmer les hypothèses ébauchées lors de l'analyse des spectres granulométriques. La prédominance de la deuxième population, répertoriée entre 12 et 15 μm (Fig. 101 - 102), s'associe à l'importance de la fraction carbonatée (Fig. 122) tandis que la population fine (Fig. 103) caractérise la concentration des minéraux argileux (Fig. 123). La supériorité de la taille des calcites néoformées leur procure alors une vitesse de sédimentation nettement plus rapide que celle des particules fines et les concentre ainsi abondamment dans les collecteurs. A la fin mai, l'accentuation de la deuxième population granulométrique (12 - 15 μm) se poursuit et elle s'accompagne également d'un enrichissement de la phase calcitique aux dépens des silicates. Ainsi, même si la masse particulaire fine qui se maintient très longtemps en suspension demeure plus ou moins constante, elle va se retrouver diluée par l'ensemble carbonaté.

En automne, l'augmentation du flux sédimentaire avait été attribué à un enrichissement des minéraux détritiques d'origine externe ou dûs à des mécanismes de resuspension interne. Cette interprétation se trouve confirmée par la nature silicatée des particules qui accompagnent les calcites néoformées et par la légère croissance de la concentration de la population granulométrique fine.

L'abondance et l'origine néocristalline des calcites particulières sont soutenues par une observation au MEB qui permet de reconnaître et d'authentifier de magnifiques cristaux avec macles de croissance indubitable (Photo 1 - 2).

VI.4. Conclusion

La composition minéralogique globale des matières en suspension dans le lac de Neuchâtel subit de fortes variations saisonnières causées principalement par l'importance des particules biologiques et des minéraux endogènes et authigènes. En effet, le cycle limnologique commence par un réchauffement épilimnique printanier qui emorce une intense prolifération diatomique susceptible d'enrichir ultérieurement la population particulaire. Leur développement physiologique, lié à l'augmentation thermique, va créer de nouvelles conditions physico-chimiques (diminution du CO_2 , augmentation du PH et de la concentration en oxygène dissous) propices à la précipitation des carbonates de calcium, induisant ainsi une augmentation corollaire de la charge des particules en suspension. Toute l'évolution estivale ultérieure dépendra ensuite de l'intensité de ces mécanismes biologiques et chimiques; l'influence des apports détritiques s'en trouvera alors fortement atténuée.

La diminution relative des minéraux argileux et silicatés entre les mois de mai et d'août peut s'expliquer par la complémentarité de 2 processus indépendants:

- Tout d'abord, les apports externes, tributaires du régime hydraulique des affluents, sont nettement plus conséquents au printemps et en automne. De plus, lors du brassage automnal des eaux, il semble que des remobilisations internes puissent également contribuer à l'enrichissement particulaire de la masse aquatique. C'est en tous cas la suggestion que laisse présager l'analyse du flux sédimentaire du mois d'octobre.

- En second lieu, la diminution estivale de la concentration des suspensions clastiques peut être partiellement relative car elle se retrouve diluée dans une masse carbonatée fortement enrichie.

La contribution de l'étude des minéraux détritiques est par contre intéressante lorsqu'ils sont caractéristiques d'une source d'apports. Ils peuvent alors constituer des traceurs naturels à l'intérieur de la masse lacustre et déterminer ainsi des provinces distinctes. Le rôle du talc et de la kaolinite est sur ce point primordial dans le lac de Neuchâtel (Fig. 110).

A côté de la précipitation des calcites, la place complexe des autres minéraux néoformés tels que les oxalates, phosphates, sulfates et formates de calcium est plus minoritaire; ils constituent néanmoins l'aboutissement de processus microbiologiques, bactériens, géochimiques et minéralogiques très importants qui mériteraient chacun des prospections très poussées qui n'ont pas pu être abordées ici.

Grâce à la compilation de plus de 200 spectres de diffraction minéralogique, nous avons tenté d'établir l'évolution annuelle de la contribution moyenne des principaux minéraux de la phase particulaire (Fig. 124). La saison estivale, riche en éléments néocristallisés, se distingue radicalement des périodes pré- et post-hivernales

marquées par des apports détritiques plus intenses.

Bien qu'il ne s'agisse pas de mesures purement quantitatives puisque l'intensité des pics prise en considération est spécifique pour chaque minéral et qu'il est hasardeux de les ramener tous sur une même base de calcul, cette analyse apporte tout de même une excellente synthèse relative de la minéralogie des particules en suspension dans le lac de Neuchâtel.

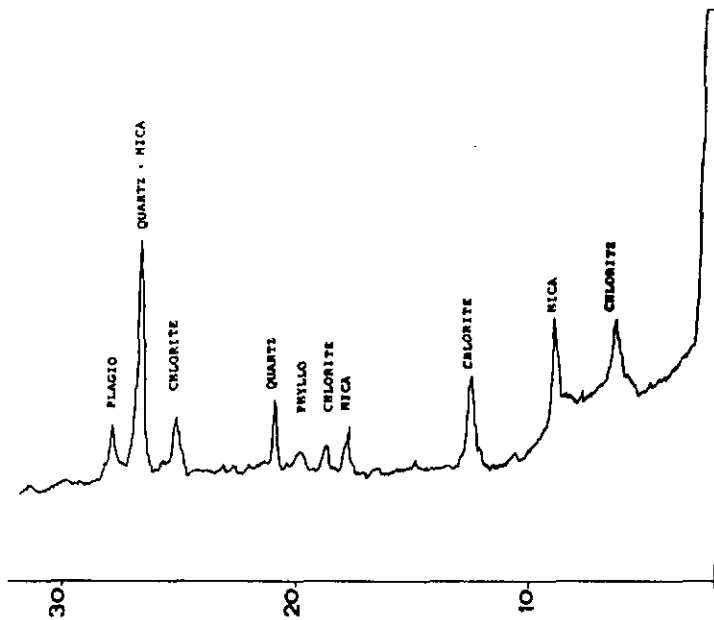


FIG. 104: Diffractogramme représentatif des minéraux argileux détritiques en suspension dans le lac (station d'Estavey - décembre 1984).

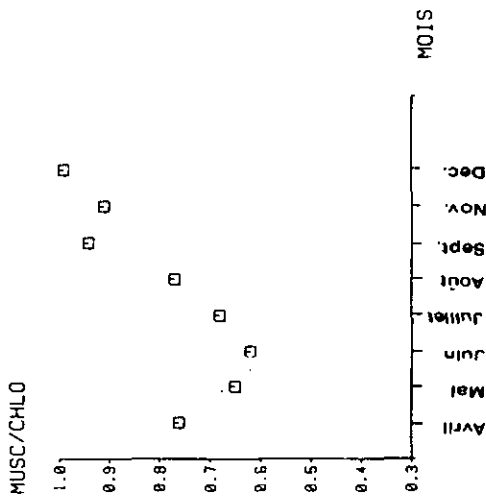


FIG. 105: Evolution annuelle du rapport Mica/Chlorite dans les suspensions lacustres.

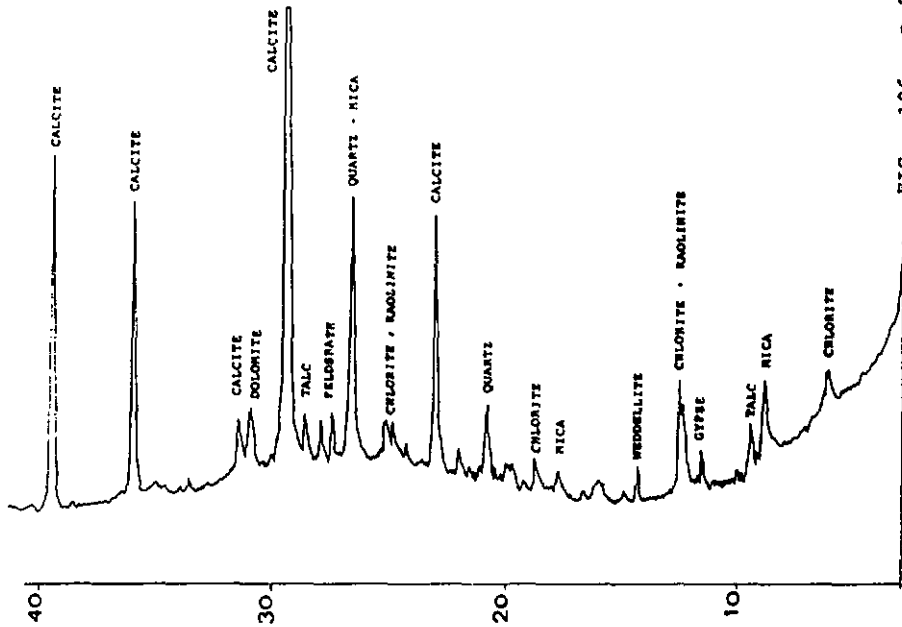


FIG. 106: Présence de Kaolinite et de Talc à l'embouchure des rivières jurassiennes (Serrières), ici à l'interface et dans l'eau surnageante (P3 sur la FIG. 9).

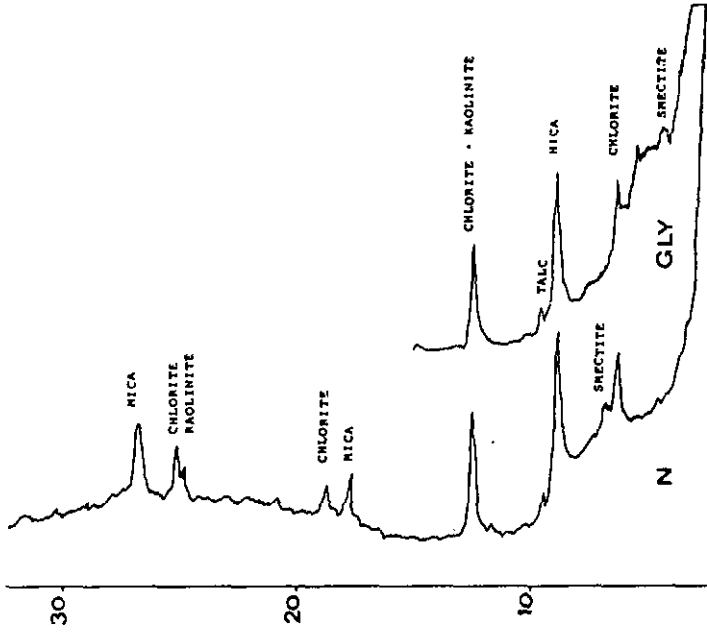


FIG. 107: Présence exceptionnelle de Smectite dans les suspensions fines (< 2 μm) du Seyon lors des crues importantes de novembre 1983.

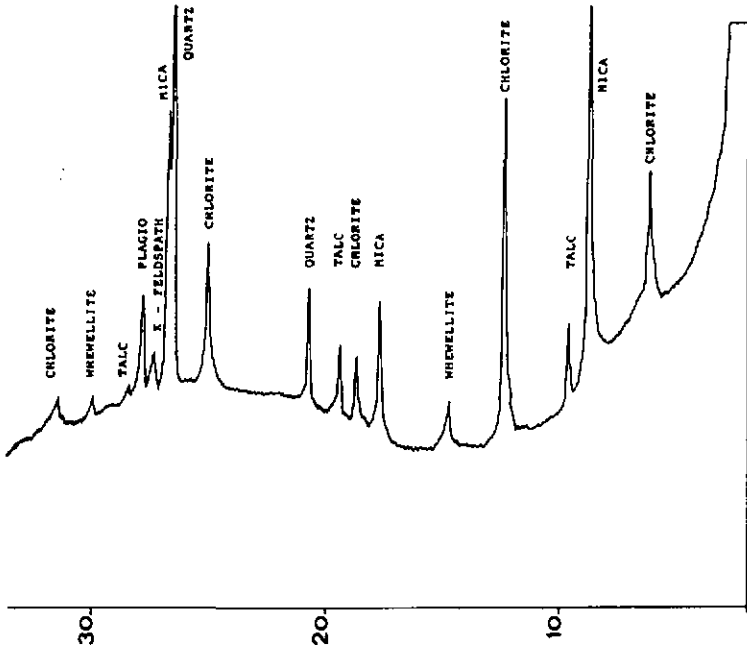


FIG. 109: Présence de Talc dans la Thielle à Yverdon, le 5 décembre 1984.

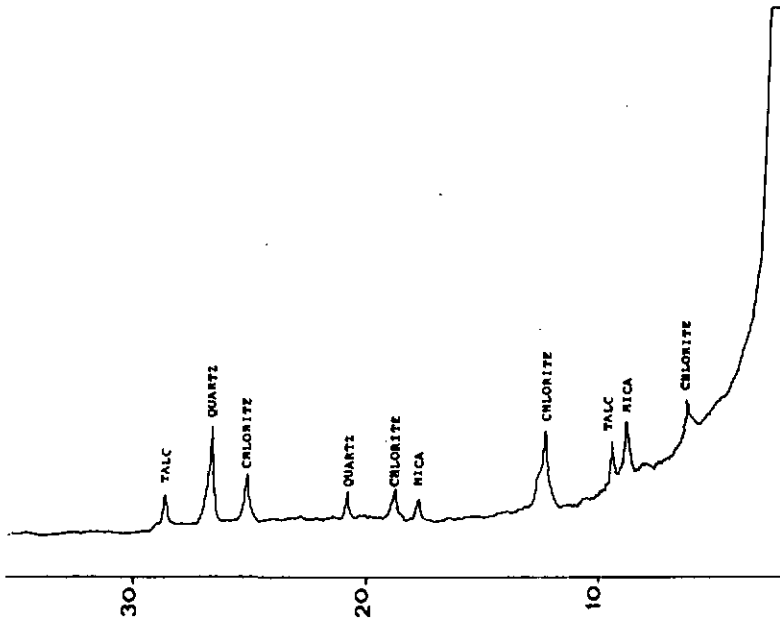


FIG. 108: Présence de Talc dans les suspensions récoltées à la station de pompage de Cudrefin, le 25 août 1983.

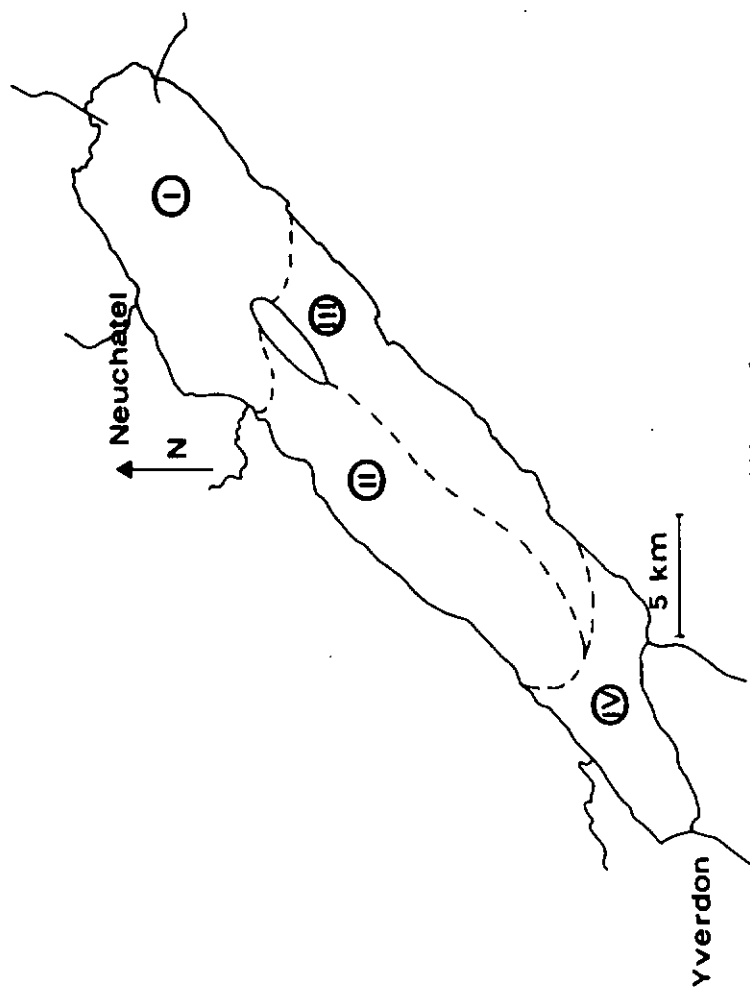


FIG. 110: Détermination de 4 masses aquatiques dans le lac de Neuchâtel selon la dispersion de la Kaolinite et du Talc.

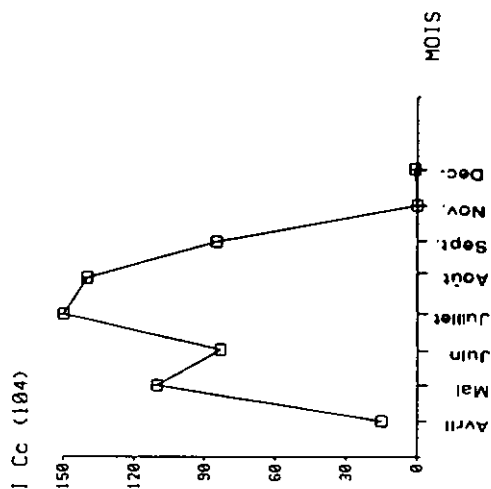


FIG. 111: Evolution annuelle de l'intensité de la Calcite selon la mesure du pic (104).

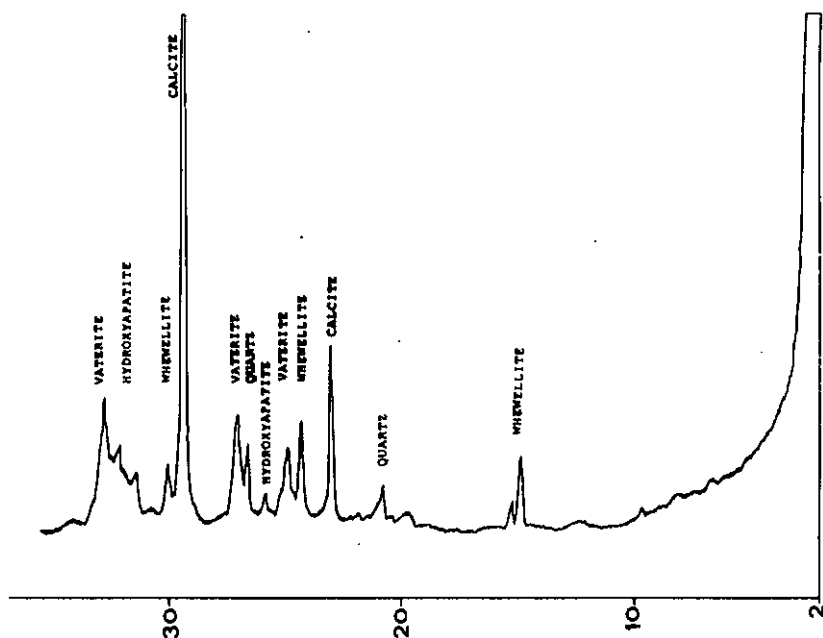


FIG. 112: Spectre caractéristique des minéraux néoformés en période estivale: Calcite - Vâtérite - Oxalates et Phosphates de calcium; faible concentration de minéraux argileux et de quartz (station de Cudrefin - 6 août 1984).

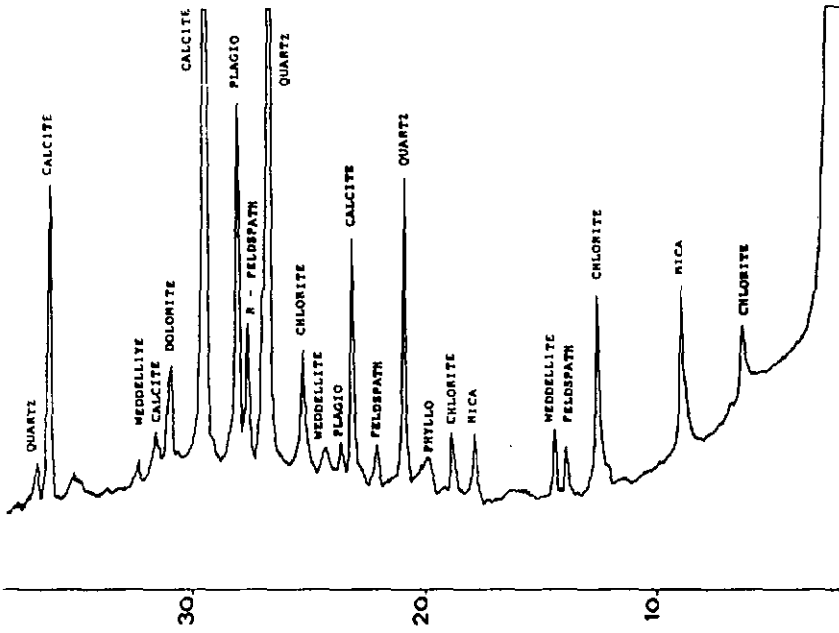


FIG. 114: Présence de Weddellite dans l'eau surnageante, à proximité du fond (PI6 - 7 juin 1984).

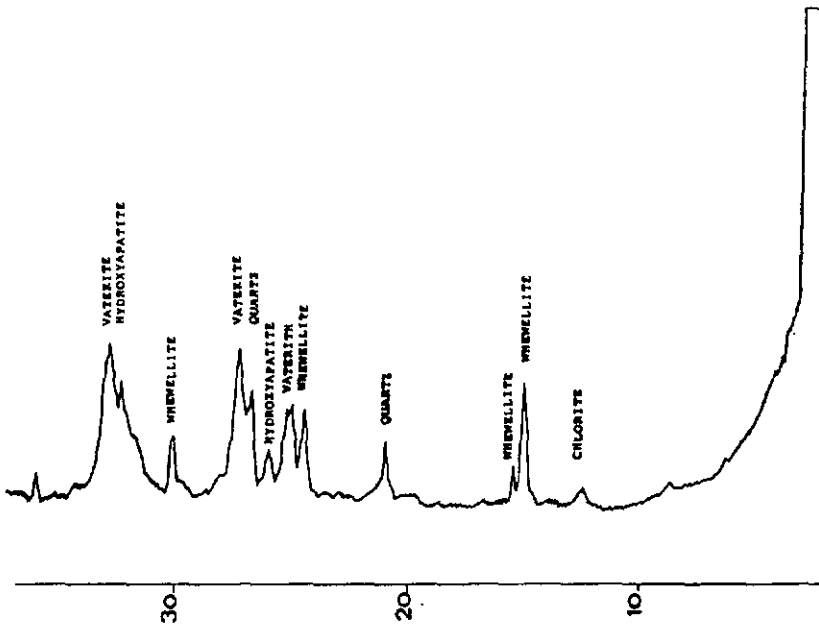
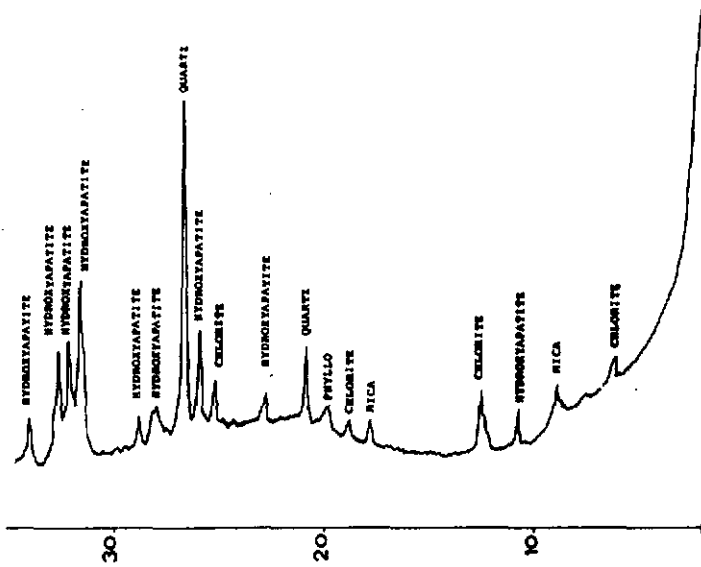
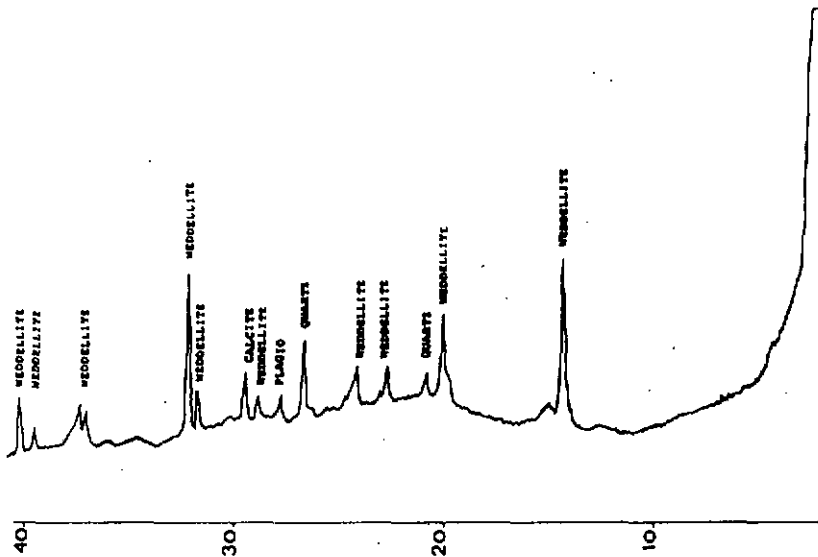


FIG. 113: Minéraux de néoformation avec une grande concentration de Whewellite et Vatérite accompagnée de traces d'Hydroxyapatite (IV B - 80 m - 4 juillet 1984).



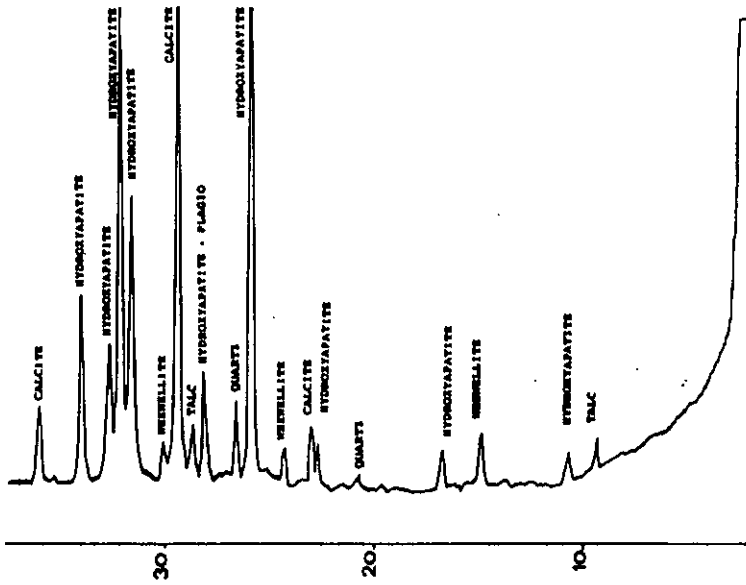


FIG. 118: Hydroxyapatite, Whewellite et Talc (I B - 1 m du fond - 4 juillet 1984).

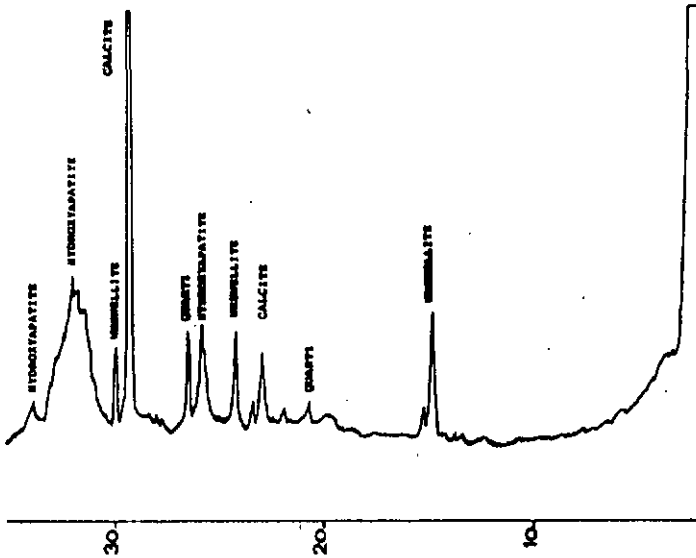


FIG. 117: Diffractogramme d'une Hydroxyapatite mal cristallisée accompagnée de Whewellite (IV A - 30 m - 4 juillet 1984).

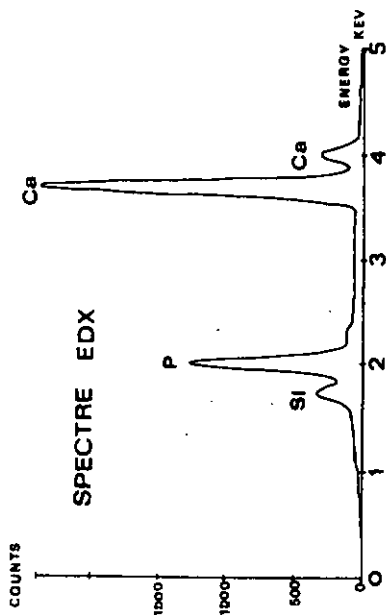
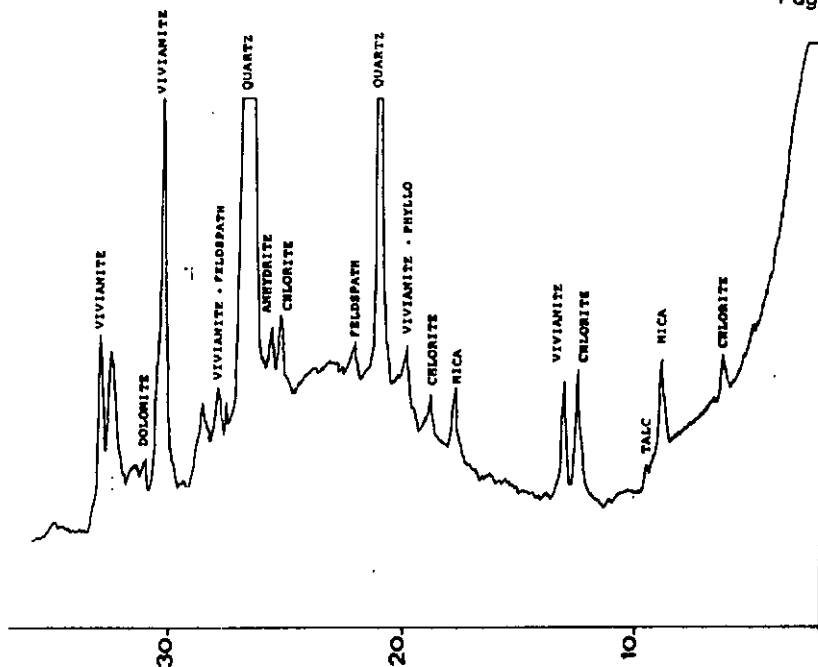


FIG. 119: Spectre EDX d'une Hydroxyapatite (Cudrefin - 25 mai 1984).

FIG. 120: Présence de Vivianite à la station de Portaban, 31 octobre 1983.

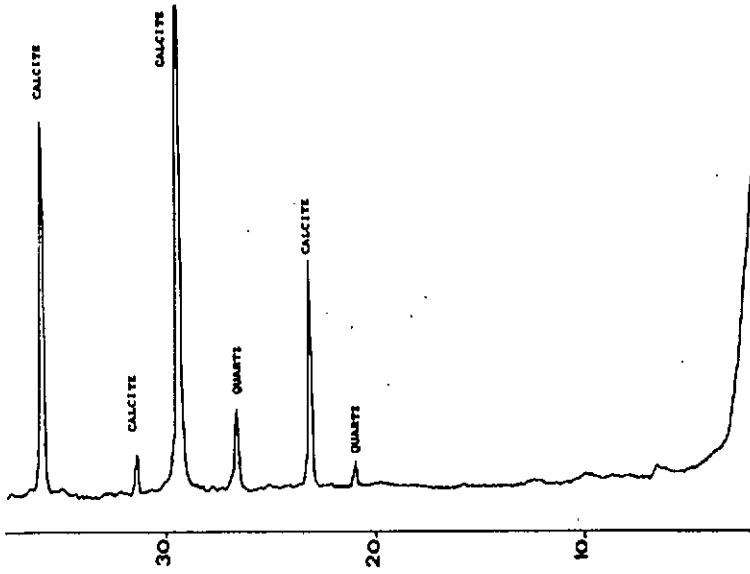


FIG. 122: Diffractogramme de la poudre composée des particules récoltées par pièges entra le 20 et le 29 mai 1986, à 5 m du fond du lac.

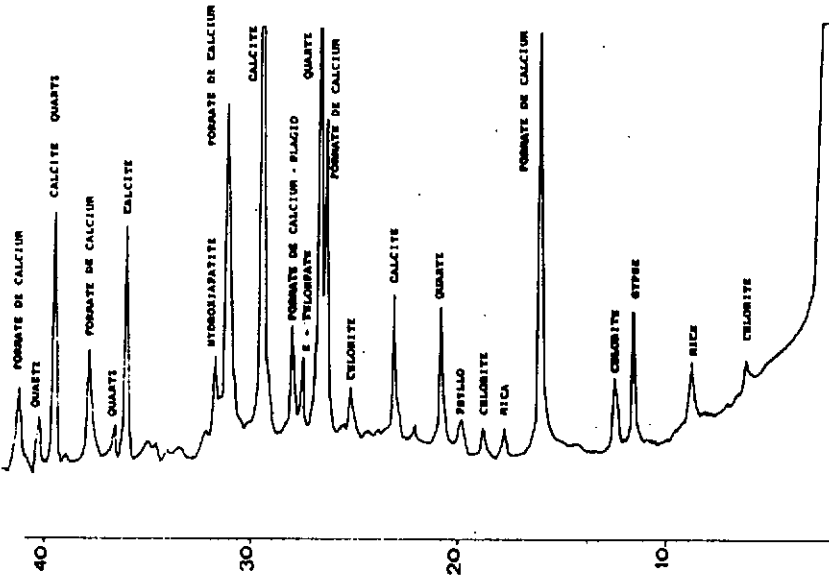


FIG. 121: Sulfates (Gypse) et Calcium dans l'eau surnaissante (P15 - 7 juin 1984).

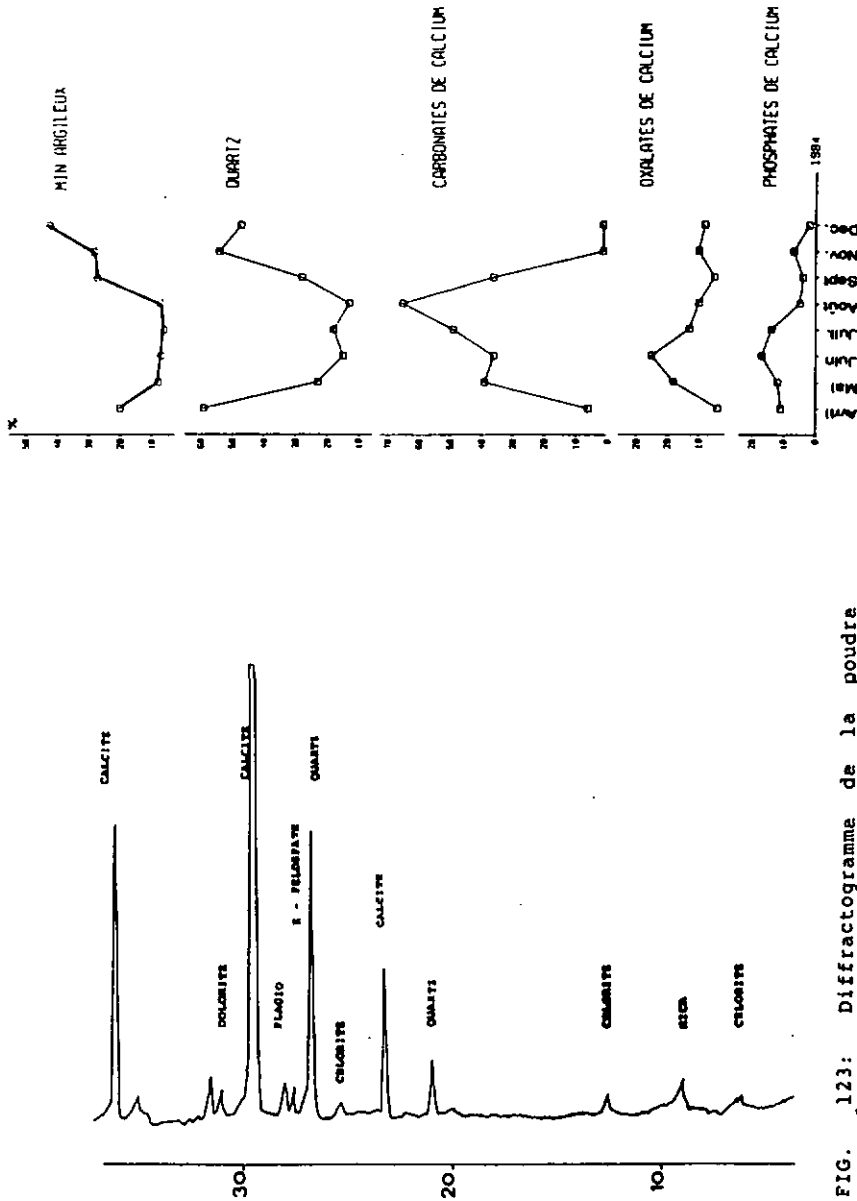


FIG. 123: Diffractogramme de la poudre composée des particules récoltées par pièges en octobre 1986, à 60 m de profondeur, marqué par une certaine concentration de Quartz et de minéraux argileux.

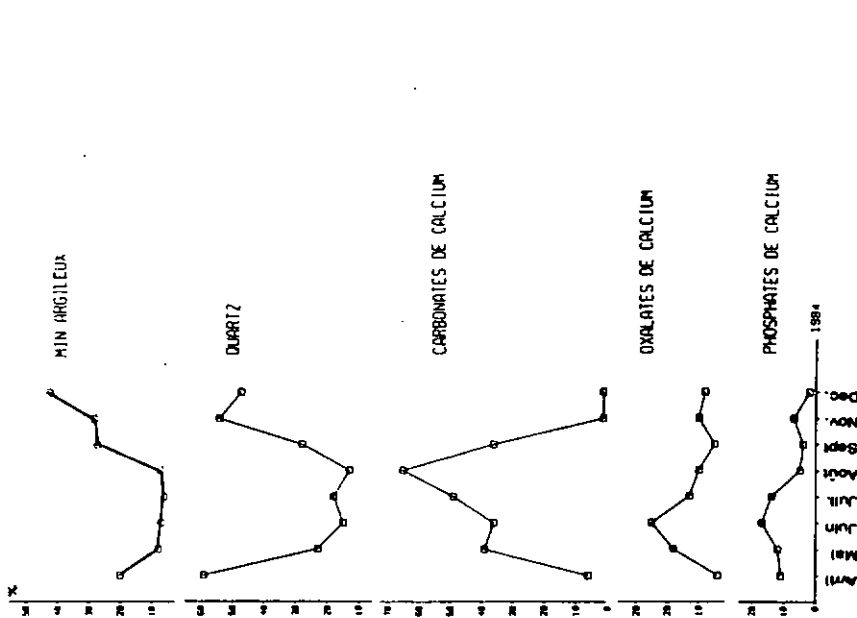


FIG. 124: Evolution annuelle de la concentration relative des minéraux en suspension dans le lac de Neuchâtel.

VII. GEOCHIMIE DES PARTICULES EN SUSPENSION.

VII.1. Méthodologie.

A. Introduction

La détermination géochimique des particules en suspension n'est pas aisée car la plupart des méthodes analytiques appliquées à leur approche nécessitent des concentrations de matériel fort élevées qui ne se rencontrent que très rarement en milieu aquatique. Bien que des moyens performants et mieux adaptés aux concentrations infimes commencent à se multiplier (Activation neutronique, spectrométrie d'émission, spectrométrie par émission de plasma, etc.), ils demeurent encore trop restreints et fort dispendieux; ils révèlent en outre des résultats dont la représentativité géochimique en milieu naturel peut parfois être soumise à caution.

Cette réserve doit spécialement être appliquée aux analyses particulaires par microsonde à énergie dispersive (EDX) reliée à un microscope électronique à balayage (MEB). En effet, les préparations de particules minérales et organiques déposées sur un filtre présentent une surface fort accidentée et un milieu très poreux qui engendrent d'intenses perturbations au parcours des rayons émis. Il nous a donc paru trop hasardeux de généraliser cette méthode à l'étude chimique globale des matières en suspension (MES), même en moyennant les résultats sur plusieurs aires de répartition. Par contre, la focalisation du rayonnement incident sur une seule particule peut constituer un précieux soutien lors de son individualisation minéralogique (Bassin, 1975; Bishop and Biscaye; 1982). Une telle application nous a permis d'authentifier la morphologie structurale des hydroxyapatites (Fig. 119), des calcites néocristallines et des divers minéraux argileux.

B. Méthodes analytiques

Les analyses géochimiques ont été restreintes aux 9 échantillons de suspension prélevés par collecteurs aux 3 profondeurs et 3 périodes précitées (chap. IV), à 4 prélèvements de particules en suspension dans l'eau surnageante ou à proximité de l'interface sédimentaire et à 6 courtes carottes de sédiment (env. 10 cm de longueur).

Les modalités de mise en solution pouvant être multiples, nous avons adopté une méthode largement utilisée lors d'analyses de sédiments ou de sols meubles (Kübler et al., 1979). Les échantillons de particules et de sédiment sont traités par une méthode relativement douce vis-à-vis des

alumino-silicates et autres phyllo-silicates (Beck, 1987): sur une aliquote de 1 gramme d'échantillon séché à 110 °C pendant une nuit, on ajoute 20 ml d'HCl 1 N et on chauffe à 80 °C durant 30 minutes sous agitation. Après filtration sur une membrane Millipore (HVLP), le filtrat est amené à 100 ml avec de l'eau désionisée. Le résidu insoluble (RI) est pesé et rapporté au poids initial total (% RI).

Dans la phase soluble, les cations (Mg, Sr, Mn, Fe, K, Al, Cu, Pb, Ni, Zn) sont dosés par absorption atomique (Perkin Elmer 603). Le calcium est analysé potentiométriquement sur un Metrom 67B avec une électrode spécifique de calcium. Une méthode colorimétrique (Technicon Autoanalyser) a été utilisée pour le dosage des anions du phosphate et de silicate acido-solubles.

VII. 2. Géochimie des particules et du sédiment.

Les résultats des analyses chimiques sont présentés sur le tableau 12. Les échantillons de la série "T" proviennent des collecteurs de particules exposés durant les 3 périodes précitées. Les 4 échantillons de la série "P" ont été prélevés dans l'eau surnageante à proximité du fond et à l'interface sédimentaire. Ils étaient situés dans les diverses provinces du lac (voir situation sur Fig. 9). Les 6 échantillons de la série "P'" (correspondant à la situation de P sur la Fig. 9) sont des sédiments récents du lac qui forment environ 10 cm d'épaisseur (Beck, 1987). Ces deux derniers groupes peuvent constituer une base référentielle de la composition chimique des particules benthiques et des sédiments lacustres.

Après un traitement initial des résultats, il ressort plusieurs constatations très significatives. Elles permettent d'affiner les interprétations minéralogiques et les caractérisations limnologiques qui en avaient découlées.

1. Les 6 prélèvements printaniers diffèrent toujours notablement des 3 échantillons d'octobre (Tableau 12).

2. La composition géochimique des suspensions automnales s'apparente globalement à celle des particules d'interface et du sédiment (Tableau 12 - Fig. 125-131).

3. Les coefficients de corrélation ne sont pas directement affectés par ces diversités saisonnières car ce sont essentiellement des augmentations élémentaires de la phase détritique qui les caractérisent (Fig. 125-129).

TABLEAU 12: Composition chimique des suspensions récoltées par pièges (T), des suspensions d'interface (P) et des sédiments (P').

BOH	PROP	RI	COA	PO4	SiO2	CA	MG	SR	PN	FE	K	AL	CU	ZN	NI	PB	BALANCE
T1	30	24.56	1.04	.1491	.1847	29.98	.1312	.0237	.0119	.2187	.0169	.0895	.0014	.0071	.0016	.0053	102.4
T2	60	20.58	.76	.1349	.1609	32.63	.1228	.0260	.0178	.2476	.0158	.0891	.0017	.0095	.0018	.0039	104.7
T3	95	20.44	1.02	.1603	.2104	31.75	.1428	.0283	.0270	.2696	.0200	.1298	.0015	.0123	.0019	.0036	102.9
T4	30	17.97	2.14	.1508	.1424	33.89	.1197	.0275	.0120	.1596	.0140	.0399	.0014	.0078	.0016	.0038	104.5
T5	60	20.18	1.40	.1411	.1745	31.74	.1211	.0250	.0153	.1993	.0169	.0767	.0014	.0098	.0023	.0043	101.7
T6	95	17.21	1.58	.1147	.1838	32.74	.1233	.0234	.0169	.2076	.0130	.0779	.0014	.0084	.0029	.0035	101.5
T7	30	27.89	.85	.1491	.4732	27.81	.3579	.0249	.0308	.7953	.0318	.3082	.0018	.0063	.0028	.0035	103.2
T8	60	29.35	.86	.1382	.3626	27.78	.3178	.0261	.0318	.5958	.0268	.2284	.0017	.0060	.0026	.0033	103.5
T9	95	30.68	.68	.2282	.3758	27.63	.2894	.0282	.0309	.6985	.0289	.2195	.0020	.0060	.0026	.0041	104.6
P3	30	40.44	.48	.1608	.4758	23.40	.3481	.0298	.0338	.8950	.0288	.2884	.0025	.0056	.0031	.0033	104.5
P20	135	28.22	.53	.1417	.5878	27.48	.2882	.0199	.0417	.9441	.0298	.3280	.0027	.0145	.0031	.0047	102.9
P2	34	25.10	.63	.1044	.4216	29.76	.2975	.0236	.0248	.4958	.0347	.2380	.0023	.0064	.0028	.0044	103.6
P16	60	43.35	.56	.1433	.3850	23.48	.2793	.0188	.0339	.6983	.0259	.2294	.0029	.0065	.0027	.0049	104.7
P'2	34	29.14		.1372	.5230	26.23	.4458	.0244	.0280	.6241	.0341	.2377					100.3
P'4	90	29.62		.1532	.5430	26.10	.3993	.0269	.0308	.6788	.0359	.2496					99.4
P'6	135	31.93		.1840	.5117	24.90	.3768	.0245	.0374	.6347	.0298	.1983					99.7
P'6	65	30.42	.16	.1702	.5281	25.97	.4169	.0271	.0298	.6452	.0314	.2482					101.2
P'22	120	21.25	.36	.1287	.4926	28.83	.2883	.0234	.0388	.5965	.0284	.1889					98.5
P'23	135	28.66	.18	.1324	.5816	26.55	.3585	.0258	.0435	.7568	.0352	.2290					101.2

A. Covariation interélémentaire de Fe-Mg-Mn-K-Al-Cu-Ni.

Les coefficients de corrélation entre les fractions acido-solubles de ces divers éléments composant principalement les minéraux argileux et silicatés sont généralement bons à très bons (Tableau 13). La présence de Fe et Mg dans cette association corrélatrice implique que la phase carbonatée, susceptible d'en intégrer, n'en apporte en fait aucune contribution significative. En effet, tous deux corrélaient très bien avec Al, élément indubitablement phyllo-silicaté (Tableau 13 - Fig. 125). De plus, la concentration élémentaire des 2 périodes printanières opère une nette scission avec celle du mois d'octobre, plus proche de la composition des particules d'interface et du sédiment (Fig. 125-126).

Le manganèse s'intègre également assez bien dans ce schéma corrélatif (Fig. 127) avec de bons coefficients (Tableau 13). Au printemps, il présente toutefois une augmentation notable de la concentration avec la profondeur. Durant la période initiale, sa concentration à 5 m du fond s'apparente même à celle des échantillons automnaux et à celle des sédiments lacustres (Fig. 127).

B. Covariation de Fe-Mg-Mn-K-Al-Cu-Ni avec le SiO₂.

L'excellente corrélation de ces éléments avec le SiO₂ (Tableau 13 - Fig. 128) les confirme dans leur appartenance à une même phase minéralogique. La contribution silicique à la phase acido-soluble proviendrait donc presque unilatéralement des alumino-silicates. Elle ne dépendrait ainsi que fort succinctement de la silice des diatomées qui sont épisodiquement très abondantes dans le matériel particulaire. Cette constatation est en accord avec des observations réalisées au MEB qui dévoilent de magnifiques espèces diatomiques dans du matériel préalablement décarbonaté (Rüch, comm. pers.).

C. Covariation des éléments des alumino-silicates avec le résidu insoluble (RI).

Le RI des échantillons printaniers est notablement plus faible que celui des suspensions d'octobre et des sédiments (Tableau 12). Il conserve ainsi la même dichotomie saisonnière et maintient les suspensions automnales dans leur similarité avec les dépôts lacustres. Les coefficients de corrélation demeurent significatifs (Tableau 13) bien qu'ils soient légèrement perturbés par 2 échantillons d'interface qui proviennent de zones peu profondes influencées par des apports allochtones (Fig. 129).

TABLEAU 13: Coefficients de corrélation interélémentaire (R).

Eléments	R	Nombre de paires
Al - K	.87	19
Al - Fe	.96	19
Al - Mn	.80	19
Al - Mg	.84	19
Al - Cu	.77	13
Al - Ni	.78	13
K - Fe	.83	19
K - Mn	.77	19
K - Mg	.93	19
K - Cu	.71	13
K - Ni	.68	13
Fe - Mn	.87	19
Fe - Mg	.82	19
Fe - Cu	.81	13
Fe - Ni	.77	13
Mn - Mg	.72	19
Mn - Cu	.79	13
Mn - Ni	.73	13
Mg - Cu	.70	13
Mg - Ni	.75	13
Al - SiO ₂	.89	19
K - SiO ₂	.93	19
Fe - SiO ₂	.90	19
Mn - SiO ₂	.87	19
Mg - SiO ₂	.92	19
Cu - SiO ₂	.81	13
Ni - SiO ₂	.80	13
Al - RI	.70	19
K - RI	.57	19
Fe - RI	.75	19
Mn - RI	.58	19
Mg - RI	.64	19
Cu - RI	.82	13
Ni - RI	.53	13
RI - SiO ₂	.67	13

D. Covariation des éléments très sensibles à l'attaque HCl.

Le calcium présente une excellente corrélation négative avec le RI dans les suspensions ($R = - .99$); elle est légèrement affectée lors de l'introduction du dosage des sédiments ($R = - .93$). Son indépendance vis-à-vis des alumino-silicates est vérifiée par de bons coefficients négatifs avec Fe-Mg-Mn-K-Al-Cu ($R = - .80$ à $- .90$). Il possède également une bonne corrélation avec le carbone organique acido-soluble (COA) (Fig. 130), alors que celui-ci évolue négativement envers le RI ($R = - .71$) et tous les éléments des alumino-silicates ($R = - .75$ à $- .80$).

Cette évolution comparable du calcium et du COA juxtaposerait la précipitation carbonatée à la production planctonique. Pour les 3 périodes étudiées, les concentrations maximales se situent à la fin mai.

E. Le Carbone Organique.

Dans les sédiments, le carbone organique total [COT] atteint rarement 2 % (Beck, 1987). Dans les suspensions d'octobre, ce pourcentage n'est que très légèrement dépassé (Tableau 14). Par contre, la concentration du COT est beaucoup plus élevée au printemps, spécialement à la base de la couche épilimnique (Tableau 14). Elle peut même atteindre près de 6 % à la fin mai. Il est aussi intéressant de noter que les concentrations printanières sont tout à fait similaires à 60 et à 95 m de profondeur.

La subdivision du CDT en COA (Carbone organique Acido-soluble) et en CORI (Carbone Organique du Résidu Insoluble; voir VII.1.B) permet toutefois de déceler des variations verticales qui pourraient provenir d'une minéralisation hétérogène. En effet, le rapport COA/CORI des mois d'avril et mai marque une nette atténuation à 60m de profondeur (Tableau 14). A proximité du fond, le COA s'élève à nouveau distinctement.

En octobre, par contre, cette recrudescence benthique du COA a disparu; elle est remplacée par une diminution caractéristique à partir des couches sous-jacentes.

La dichotomie saisonnière qui règne dans la composition particulière se répercute donc aussi sur les différentes fractions de Carbone Organique.

TABLEAU 14: Concentration des différentes formes du Carbone dans les particules en suspension dans le lac de Neuchâtel (en % du matériel total).

CTOT = Carbone Total
 CMIN = Carbone Minéral
 COT = Carbone Organique Total
 CORI = Carbone Organique du Résidu Insoluble
 COA = Carbone Organique Acido-soluble

avec: CTOT = CMIN + COT
 COT = CORI + COA

ECH.	Prof.	CTOT	CMIN	COT	CORI	COA	COA/CORI
T1	30 m	13.41	9.14	4.27	3.23	1.04	0.32
T2	60	12.96	9.49	3.47	2.71	0.76	0.28
T3	95	12.76	9.29	3.47	2.41	1.02	0.42
T4	30	15.24	9.43	5.81	3.67	2.14	0.58
T5	60	14.15	9.73	4.42	3.02	1.40	0.46
T6	95	14.28	9.88	4.40	2.82	0.58	0.56
T7	30	11.12	8.47	2.65	1.80	0.85	0.47
T8	60	11.07	8.11	2.96	2.10	0.86	0.41
T9	95	10.51	8.13	2.38	1.72	0.66	0.38

F. Cas des phosphates acido-solubles.

Les phosphates acido-solubles ne présentent aucune corrélation significative avec les autres éléments analysés. Cependant, l'existence d'hydroxy-orthophosphates de calcium (hydroxyapatite) a été démontrée parmi les suspensions (chap. VI.3.B). Les phosphates pourraient donc se rattacher à cette phase minéralogique néocristalline. La mauvaise corrélation qu'ils manifestent vis-à-vis du calcium n'excluerait en rien cette affectation car la concentration prioritaire de cet élément est rattachée aux calcites. Or, la fraction hydroxyapatitique est toujours nettement plus faible que celle des carbonates de calcium.

G. Cas du Strontium.

La relation du strontium avec le calcium est surprenante. Il est effet communément admis et démontré que la majorité du strontium est coprécipité avec la calcite (Kübler et al., 1979). Or, lorsqu'on associe les résultats des échantillons de sédiments, relativement homogènes en Ca et en Sr, avec ceux des suspensions, il n'y a plus aucune corrélation (Fig. 131). Par contre, si l'on ôte les sédiments et les suspensions d'octobre qui leur sont comparables, on retrouve une bonne corrélation entre Ca et Sr. Le nombre d'échantillons devient toutefois trop restreint pour accorder une valeur hautement significative à son coefficient de corrélation.

Les suspensions printanières, très riches en calcite, présentent donc une relation Ca-Sr individuelle qui ne peut être directement transposée dans les dépôts sédimentaires. Ici, les concentrations de strontium sont trop importantes vis-à-vis de celles du calcium. Tout se passe comme si la précipitation carbonatée particulière était très rapide et serait alors incapable d'inclure suffisamment de Sr dans les réseaux cristallins néocalciques. Un réajustement s'opérerait après la sédimentation des particules.

VII.3. Essai de détermination du flux sédimentaire du phosphore acido-soluble.

D'après toutes les mesures turbiditiques et tous les résultats des pesées de résidus particuliers secs, les échantillons récoltés à 60 m de profondeur sur un profil bathymétrique de 100 m peuvent sans contexte représenter l'état de la couche hypolimnique claire. C'est pourquoi nous accepterons que le flux particulaire de ce niveau sera tout à fait représentatif de la sédimentation des matières solides.

A cette cote, la concentration du phosphate acido-soluble est remarquablement stable lors des 3 périodes d'échantillonnage (Fig. 132). Sa moyenne atteint 0.14 % du sédiment total. La moyenne du flux annuel total avait été déterminée aux environs de 4.2 g/m²·jour (chap. IV). Il implique alors un flux annuel moyen de 5.9 mg/m²·jour de phosphate acido-soluble, soit 2.1 g/m²·année.

En admettant une certaine homogénéité de ce flux sur l'ensemble de la surface sédimentaire du lac épargnée par l'hydrodynamisme des vagues, c'est-à-dire au-delà d'une vingtaine de mètres de profondeur (soit près de 160 km²; Solberger, 1974), il serait possible d'estimer la quantité de PHOSPHORE acido-soluble qui disparaîtrait annuellement de la masse aquatique du lac par sédimentation. Elle atteindrait approximativement 120 tonnes.

VII.4. Conclusion.

L'observation des analyses géochimiques des particules en suspension récoltées par pièges permet de confirmer les diverses conclusions émises sur le comportement limnologique vertical saisonnier. L'identification des particules printanières, riches en calcium et en carbone organique acido-soluble, pauvres en éléments principaux des minéraux phyllo-silicatés et en résidu insoluble, est caractéristique de processus biologiques et chimiques internes. Elle correspond à l'établissement de la stratification thermique et à l'élaboration des diverses couches turbiditiques de la colonne aquatique.

En octobre, au contraire, l'enrichissement accentué en Fe-Mg-Mn-K-Al-Cu et SiO₂ correspond à une atténuation de la concentration du calcium et du carbone organique acido-soluble. Cette forte différence saisonnière de la composition des particules équivaut à un transfert de la géochimie des suspensions automnales dans le domaine caractéristique des sédiments. Cette particularité qualitative nous conforte dans l'hypothèse déjà émise lors du traitement des analyses dynamiques, granulométriques et minéralogiques de ces échantillons: les matières en suspension durant le mois d'octobre 1986 sont très semblables aux dépôts sédimentaires; elles peuvent donc résulter de la remise en suspension des particules préalablement déposées par des courants qui se manifestent à proximité du fond.

Les résultats analytiques du manganèse abondent dans le même sens. Cet élément est en effet généralement considéré comme une résultante des réactions géochimiques d'interface à la fin d'une période de stratification thermique (Sturm et al., 1982); il constitue donc un indicateur de l'origine du matériel particulaire. Or, sa concentration printanière est très faible, sauf à 5 m du fond durant la première période d'exposition; le manganèse y subirait alors une alimentation résiduelle à partir de l'interface activée durant l'hiver par les courants de fond.

En automne, la concentration du manganèse particulaire est comparable à celle des sédiments. Cette similitude permet de rattacher la plupart des particules en suspension aux dépôts lacustres récents qui en seraient alors la source principale.

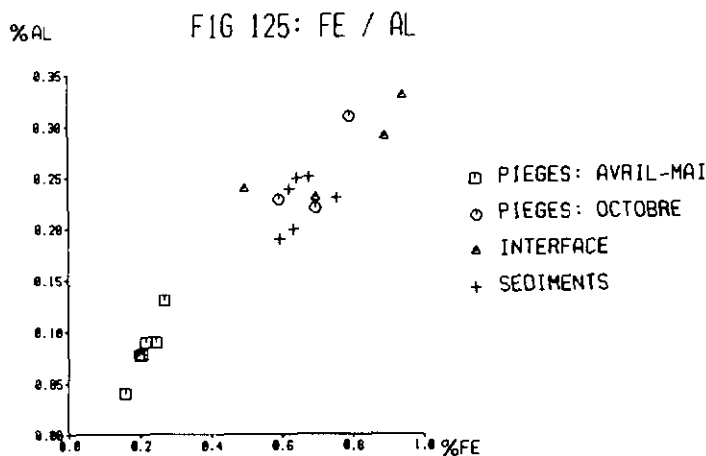


FIG. 125: Corrélation entre le fer et l'aluminium dans les suspensions récoltées en 1986 (9 éch.), à l'interface (4 éch.) et dans le sédiment (6 éch.). Le coefficient de corrélation vaut 0.96. La population particulière printanière se distingue très nettement des suspensions d'octobre qui s'apparentent à celles d'interface et au sédiment.

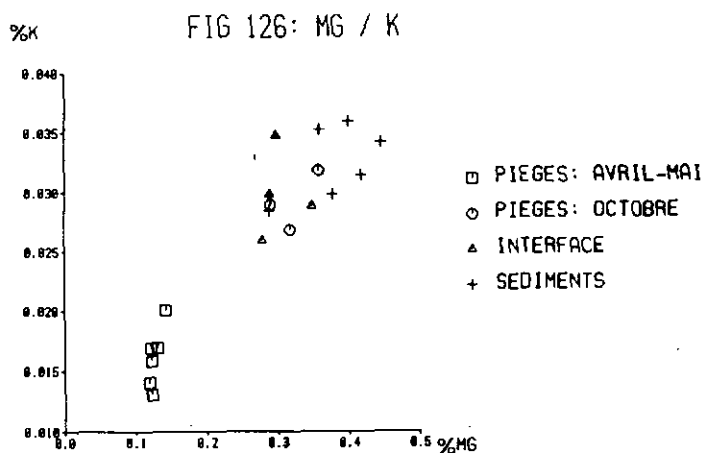


FIG. 126: Corrélation entre le magnésium et le potassium ($R = 0.93$). La population particulière printanière se distingue très nettement des suspensions d'octobre qui s'apparentent à celles d'interface et au sédiment.

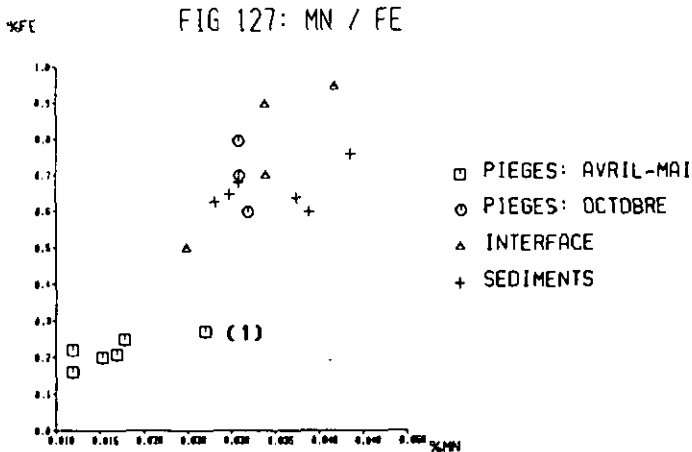


FIG. 127: Corrélation entre le manganèse et le fer ($R = 0.87$). L'échantillon (1) provient de la première période de récupération (26.04.86 - 20.05.86) à 5 m du fond. La population particulière printanière se distingue très nettement des suspensions d'octobre qui s'apparentent à celles d'interface et au sédiment.

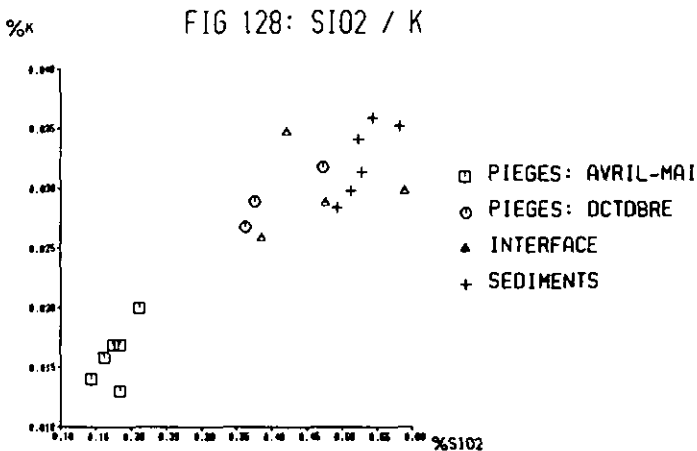


FIG. 128: Corrélation entre SiO₂ et potassium ($R = 0.93$). La population particulière printanière se distingue très nettement des suspensions d'octobre qui s'apparentent à celles d'interface et au sédiment.

%AL

FIG 129: RI / AL

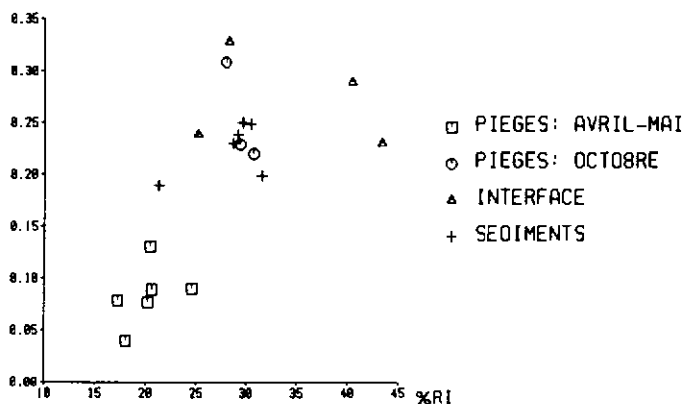


FIG. 129: Corrélation entre le RI et l'aluminium ($R = 0.70$). Les 2 échantillons riches en RI proviennent d'une zone peu profonde (P3) ou du haut-lac (P16). La population particulière printanière se distingue très nettement des suspensions d'octobre qui s'apparentent à celles d'interface et au sédiment.

% COA

FIG 130: CA / COA

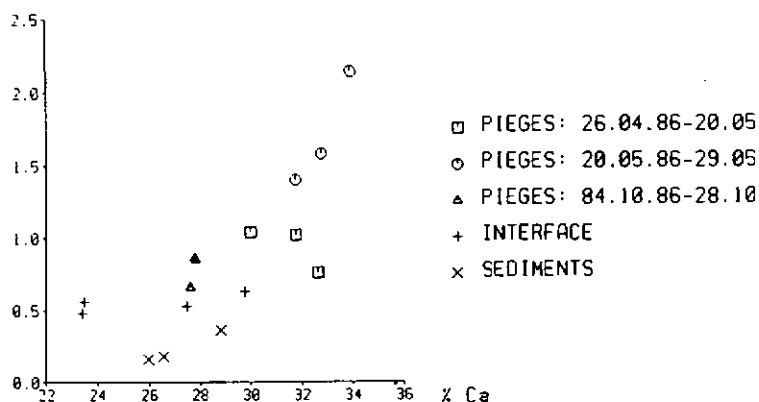


FIG. 130: Corrélation entre le calcium et le carbone organique acido-soluble (COA). Les 2 échantillons riches en RI (P3 - P16) sont pauvres en calcium. Les suspensions de la fin mai sont les plus riches en Ca et COA.

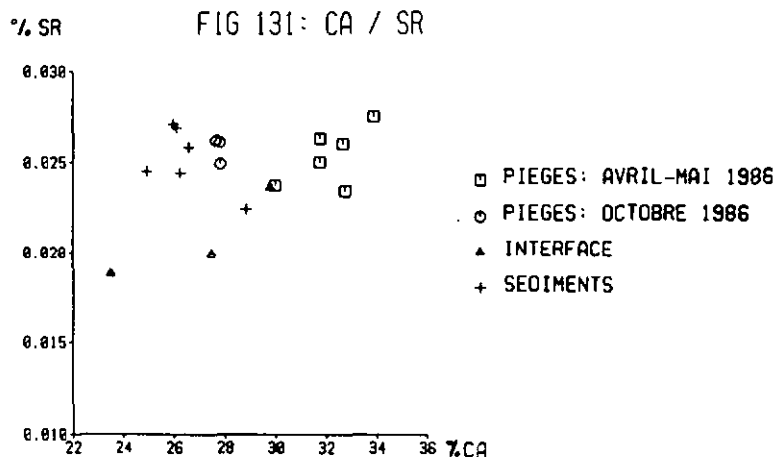


FIG. 131: Covariation entre calcium et strontium; les suspensions d'octobre et les sédiments se distinguent par un enrichissement en strontium.

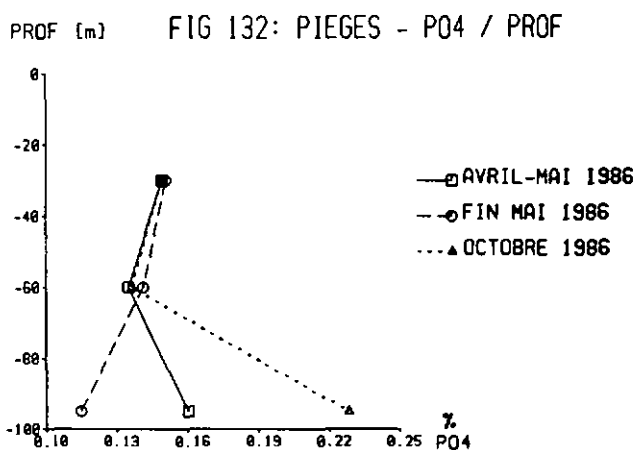


FIG. 132: Variation de la concentration du phosphate acido-soluble avec la profondeur dans les suspensions récoltées par pièges.

VIII CONCLUSION GENERALE.

La reconnaissance des particules en suspension dans un milieu aquatique est capitale pour une meilleure compréhension des processus dynamiques, biogéochimiques, biologiques et sédimentologiques qui s'y déroulent.

VIII.1. Dans ce contexte, la combinaison des mesures hydrologiques et turbiditiques, réalisées avec une sonde HPTC-84 et un diffusiomètre intégrateur léger (DIL), s'est révélée d'un apport considérable pour déterminer la superposition des couches limnologiques, l'individualisation des différentes masses d'eau, la quantification et la qualification initiale de la charge particulaire en suspension.

Ainsi, au-delà de l'épilimnium riche en phytoplancton, une "stratification" turbiditique estivale a pu être reconnue; elle est formée par 3 couches nettes dont l'amplitude varie en cours d'été. Au sommet, la CLEAR WATER LAYER (CWL) renferme une très faible concentration particulaire (0.5 FTU). Lors de son extension minimale, au début juillet, elle se confond approximativement avec le métalimnium thermique.

A proximité du fond, la BENTHIC NEPHELOID LAYER (BNL) subit de forts enrichissements turbiditiques locaux et épisodiques qui peuvent atteindre une intensité de 1.0 FTU. En été, cette intensification est accompagnée par la variation des paramètres hydrologiques (abaissement du PH et de la concentration en Oxygène dissous, augmentation de la conductibilité). La conjonction de ces phénomènes tendraient à attribuer une origine bactériologique ou géomicrobiologique à la BNL; la confirmation d'une telle hypothèse n'a malheureusement pas encore pu être élaborée. Entre les 2 couches précitées, une PELAGIC NEPHELOID LAYER (PNL) caractérise une importante masse d'eau intermédiaire légèrement plus concentrée que la CWL (0.7 FTU). Elle s'amincit en cours d'été en suivant la vitesse d'implification de la CWL qui est proche de 1 m/jour. Cette vitesse a été assimilée à la sédimentation particulaire totale des suspensions.

VIII.2. La concentration particulaire est marquée par de fortes variations verticales et spatio-temporelles: intense enrichissement épilimnique printanier et estival causé par la prolifération du phytoplancton; homogénéisation verticale en cours d'été générée par la sédimentation des particules biogènes et endogènes; surcharges dans la couche benthique créées par des remaniements temporaires; appauvrissement hivernal.

La moyenne générale annuelle atteint environ 1.6 mg/l. Elle place ainsi le lac de Neuchâtel dans un état comparable à celui du Léman et légèrement en-dessous des 2.2 mg/l du lac de Zürich.

VIII.3. L'application de la diffraction des RX, associée aux observations par microscopie électronique à balayage et aux analyses par microsonde à énergie dispersive, s'est révélée capitale pour décliner l'identification des particules en suspension. En effet, malgré les nombreuses études chimiques qui se sont attardées sur leur composition élémentaire, peu de travaux se sont préoccupés de rechercher la forme cristalline de ces substances. Pourtant, les résultats sont particulièrement intéressants, trois populations distinctes ayant pu être individualisées. Elles sont caractérisées par leur genèse, par l'intensité et la nature des apports allochtones et par l'évolution saisonnière des conditions limnologiques internes.

A. Les particules biogéniques sont très riches en kystes siliceux de diatomées. Elles sont issues de la dégradation des populations planctoniques épilimniques.

B. Les particules endogènes, et peut-être parfois authigènes, constituent un exceptionnel stock estival capable de considérablement diluer la masse particulaire allogène représentée par le cortège des minéraux argileux (Micas, Chlorite, ...) et silicatés (Quartz, Feldspath, ...). Elles comprennent principalement les carbonates de calcium (Calcite, Vaterite) dont l'authenticité de la néoformation endogène est confortée par l'évolution annuelle de leur spectre d'intensité qui s'annule en hiver. Elles englobent également des variétés cristallines qui n'avaient jamais été répertoriées dans les suspensions d'un milieu lacustre actuel. Il s'agit d'oxalates de calcium (Whewellite et Weddellite), de phosphates de calcium (Hydroxyapatite) et parfois de fer (Vivianite), de sulfates et de formates de calcium.

Des études ultérieures devraient maintenant permettre d'établir les relations qui unissent très certainement l'ensemble des oxalates de calcium à la nature organique des matières en suspension ou des sédiments d'interface. De même, de nouvelles recherches devront être poursuivies pour comprendre les mécanismes physico-chimiques et bactériologiques qui régissent la minéralisation, certainement éphémère, des sulfates et des formates de calcium à proximité de la surface sédimentaire.

La définition minéralogique des particules d'Hydroxyapatite présente un intérêt indéniable. La possibilité d'attribuer une forme cristalline au phosphore particulaire, jointe à la détermination de sa concentration chimique, permettra d'affiner et de mieux comprendre les bilans sédimentaires annuels. Toutefois, leur milieu d'origine et les conditions propices à leur synthèse restent encore à éclaircir, bien qu'une attribution à un environnement fortement perturbé par des interventions anthropiques semble indubitable.

Par contre, l'origine de la Vivianite est plus certaine; elle provient fort probablement d'une minéralisation euthigène, en milieu sédimentaire réducteur, à quelques cm de l'interface. Sa présence temporaire parmi les suspensions du bas-lac viendrait alors démontrer l'existence de resuspensions sédimentaires.

Finalement, aucune particule cristalline incluant du manganèse n'a été identifiée dans le lac de Neuchâtel. De telles formes sont pourtant abondantes dans certains bassins comme le Léman ou le lac de Constance. Cette absence est révélatrice du bon état d'oxygénation permanente des couches aquatiques profondes.

C. Les particules allochtones peuvent caractériser le cheminement lacustre des suspensions et jouer ainsi la rôle de traceurs naturels lorsqu'elles sont typiques de certains affluents. La Kaolinite est restreinte aux bassins versants des rivières jurassiennes; le Talc est essentiellement concentré dans le Sayon, la Serrière et la Thialle. Leur répartition lacustre, associée aux inhomogénéités turbiditiques et hydrologiques régionales et aux variations granulométriques des particules, a permis de définir 4 masses aquatiques distinctes:

1. La plaine de Neuchâtel et le bas-lac, au Nord, Nord-Est et Est de la Motte. Les suspensions contiennent du talc et des traces de kaolinite. Ce sont également les couches profondes de cette zone qui recèlent des hydroxyapatites les mieux cristallisées, surtout en période tardi-printanière et estival. La seule présence de vivianite a été décelée en automne au large de la côte Cudrefin/Portalban.

2. La vallée NW, au pied du Jura, de Concise à l'embouchure de l'Areuse. Cette province est exempte de talc mais elle contient régulièrement des traces de kaolinite apportée par les affluents jurassiens. La granulométrie des particules, pratiquement toujours et partout bimodale, présente ici une moyenne plus élevée qu'ailleurs.

3. La vallée SE, sur la rive droite, d'Yvonand à Portalban. Cette zone est privée de kaolinite mais elle recèle de légères concentrations de talc pouvant provenir du haut-lac. Cette observation tendrait à suggérer un déversement principal des eaux du haut-lac par cette vallée SE. La BNL y atteint d'ailleurs son intensité et son extension temporelle maximales.

4. Le haut-lac, partie rétrécie entre Yvonand et Yverdon. Il est caractérisé par les apports de plusieurs affluents; il renferme du talc et, à l'embouchure de la Mentue, de magnifiques hydroxyapatites.

La reconnaissance de ces 4 bassins présente un intérêt indéniable dans l'approche de la dispersion dynamique des polluants anthropiques très fréquemment fixés sur les particules. Ces dernières constituent donc le vecteur principal de transport, que ce soit aux embouchures des affluents ou au niveau des resuspensions sédimentaires profondes.

VIII.4. Les résultats de l'implantation temporaire d'un piège à sédiment se sont révélés très fructueux. Une moyenne annuelle de $4.2 \text{ g/m}^2 \cdot \text{jour}$ a pu être avancée pour le flux particulaire total. Celui-ci induirait alors un taux de sédimentation proche de 2 mm/an dans la plaine profonde. Généralisée à l'ensemble du lac, une telle sédimentation implique le dépôt annuel de quelque 120 tonnes de Phosphore, somme comparable aux 136 tonnes évaluées par un bilan des Entrées/Sorties.

Avec un temps de résidence des eaux tout à fait semblable (8.2 ans), le lac de Lugano subit une sédimentation phosphorique annuelle de 120 tonnes et le lac des Quatre-Cantons de 160 tonnes pour un temps de séjour théorique de l'eau de 3.4 ans. La persistance d'une bonne oxygénation des couches profondes du lac de Neuchâtel, rarement inférieure à 8 mg/l , leur confère encore un excellent moyen de défense contre la resolubilisation des particules de phosphate déposées.

Une nette différence quantitative et granulométrique a été mise en évidence entre les particules organo-carbonatées piégées au printemps et les particules plus fines et plus détritiques récoltées en automne. Ces dernières présentent de fortes analogies avec les dépôts d'interface qui pourraient alors en constituer une source plausible. Une telle attribution nous permet de confirmer l'hypothèse de l'existence de resuspensions sédimentaires locales et épisodiques formulée précédemment pour expliquer la présence de vivianite parmi les suspensions. Elles se produiraient essentiellement en automne au large du talus qui s'étend le long de la côte Cudrefin/Portelban.

VIII.5. Ce travail apporte une contribution générale à la compréhension des mécanismes biogéochimiques et dynamiques qui caractérisent la nature quantitative et qualitative des particules en suspension dans le lac de Neuchâtel au cours d'un cycle limnologique.

Des études ultérieures plus sélectives pourraient se distinguer par une approche très fine d'un milieu deltaïque, représentatif des apports externes et par une approche plus soutenue des processus proprement internes. Ces dernières sont prioritaires dans l'élaboration des particules en suspension dans ce lac. Leur évolution bactériochimique verticale dans la colonne d'eau, à l'interface et dans les couches sédimentaires superficielles mériterait une caractérisation encore plus approfondie.

Il s'agirait surtout de mieux cerner la minéralisation des particules organiques en cours de sédimentation, de suivre l'évolution verticale du rapport C/P et d'y observer le rôle des bactéries. A proximité du fond, l'édification épisodique d'une couche benthique néphéloïde est certainement d'origine multiple: parfois, la dynamique des courants de fond peut être capable de générer la remise en suspension des derniers dépôts sédimentaires et d'alimenter ainsi le BNL. En plein été, par contre, il se pourrait qu'elle soit élaborée par des mécanismes plus purement bactériochimiques qui resteraient à expliquer.

BIBLIOGRAPHIE

ADATTE, T. et RUMLEY, G.; 1984.
Microfaciès, minéralogie, stratigraphie et évolution des milieux de dépôts de la plate-forme berriaso-valanginienne des régions de Sainte-Croix (Vd), Cressier et du Landeron (Ne).
Bull. Soc. Neuch. Sciences Nat.; 107; 221-239.

ALOÏSI, J.-C.; 1986.
Sur un modèle de sédimentation deltaïque - Contribution à la connaissance des marges passives.
Thèse; Université de Perpignan.

AVNIMELECH, Y.; 1983.
Phosphorus and Calcium carbonate solubilities in Lake Kinneret.
Limnol. Oceanogr.; 28; 640-645.

BAKER, C.J.L.; 1952.
Determination of oxalates in Fresh Plant Material.
Analyst; 77; 340-344.

BANNISTER, F.A. and HEY, M.H.; 1936.
Report on some crystalline components of the Weddell Sea deposits.
Discovery Reports; 13; 60-69.

BAPST, A. et KÜBLER, B.; 1987.
Evolution estivale de la turbidité dans le lac de Neuchâtel.
Schweiz. Z. Hydrol.; 49; 1; 1-15.

BARRETTO, H.T. and SUMMERHAYES, C.P.; 1975.
Oceanography and suspended matter off Northeastern Brazil.
Journal of Sedimentary Petrology; 45; 4; 822-833.

BARSDATE, R.J., PRENTKI, R.T. and FENCHEL, T.; 1974.
Phosphorus cycle of model ecosystem: significance for decomposer food chains and effects of bacterial grazers.
OIKOS; 25; 239-251.

BASSIN, N.J.; 1975.
Suspended marine clay mineral identification by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-Ray analysis.
Limnol. Oceanogr.; 20; 1; 133-137.

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.
Thèse; Université de Neuchâtel.

BISCAYE, P.E. and EITREIM, S.L.; 1977.

Suspended particulate loads and transports in the nepheloid layer of the abyssal Atlantic Ocean.
Mar. Geol.; 23; 155-172.

BISHOP, J.K.B. and BISCAYE, P.E.; 1982.

Chemical characterisation of individual particles from the nepheloid layer in the Atlantic Ocean.
Earth and Planetary Science Letters; 58; 265-275.

BLOESCH, J.; 1974.

Sedimentation und Phosphorhaushalt im Vierwaldstättersee (Horwer Bucht) und im Rotsee.
Schweiz. Z. Hydrol.; 36; 71-186.

BLOESCH, J. and STURM, M.; 1984.

Particle fluxes and sinking velocities as model parameters for the restoration of eutrophic Lake Zug, Switzerland.
3rd Symp. Interact. Sediment/Water; Geneva; 87-90.

CAILLERE, S. et MENIN, S.; 1963.

Minéralogie des argiles.
Masson; Paris VI.

CARROLL, D.; 1970.

Clay Minerals: A Guide to Their X-Ray Identification.
The Geological Society of America; Special Paper; 126.

CHAMBERS, R.L. and EADIE, B.J.; 1981.

Nepheloid and suspended particulate matter in South-eastern Lake Michigan.
Sedimentology; 28; 439-447.

COPIN-MONTEGUT, C.; 1974.

Contribution à l'étude chimique des particules en suspension dans l'eau de mer.
Thèse de Doctorat d'Etat; Université de Paris VI.

CURRIE, D.J. and KALFF, J.; 1984.

The relative importance of bacterioplankton and phytoplankton in phosphorus uptake in freshwater.
Limnol. Oceanogr.; 29; 2; 311-321.

DRAKE, D.E.; 1977.

Suspended particulate matter in the New York Bight Apex,
Fall 1973.

Journal of Sedimentary Petrology; 47; 1; 209-228.

DUBOIS, J.P. et SHETTY, O.; 1977.

Evolution de l'état sanitaire de la baie d'Auvergnier (lac de
Neuchâtel) de 1962 à 1973.

Schweiz. Z. Hydrol.; 39; 1; 1-11.

EMERY, K.O., MILLIMAN, J.D. and UCHUPI, E.; 1973.

Physical properties and suspended matter of surface waters
in the Southeastern Atlantic Ocean.

Journal of Sedimentary Petrology; 43; 3; 822-837.

FINCKH, P., KELTS, K. and LAMBERT, A.; 1984.

Seismic stratigraphy and bedrock forms in perialpine lakes.

Geol. Soc. of America Bulletin; 95; 1118-1128.

GÄCHTER, R. and MARES, A.; 1985.

Does settling seston release soluble reactive phosphorus in
the hypolimnion of lakes?

Limnol. Oceanogr.; 30; 2.

GÄCHTER, R. and BLOESCH, J.; 1986 (subm.).

Seasonal and vertical variation in the C:P ratio of
suspended and settling seston of lakes.

Hydrobiologia; submitted.

GIBSON, R.I.; 1974.

Descriptive Human Pathological Mineralogy.

American Mineralogist; 59; 1177-1182.

GRAUSTEIN, W.C., CROMACK, K. and SOLLINS, P.; 1977.

Calcium Oxalate: Occurrence in Soils and Effects on
Nutrients and Geochemical Cycles.

Science; 198; 4323; 1252-1254.

GRIFFIN, G.M., SAWYER, R.K. and MELKOTE, S.R.; 1984.

Weddellite occurrence in peats and other organic-rich
sediments in Florida.

Journal of Sedimentary Petrology; 54; 3; 861-868.

GUICHARD, J.-C. et DE BERNARD, A.; 1965.

Un appareil de mesure granulométrique: le Compteur
automatique Coulter.

Chimie Analytique; 47; 3; 145-151.

HANSELMANN, K.W.; 1986.

Microbially Mediated Processes in Environmental Chemistry
(Lake Sediments as Model Systems).

Chimia; 40; 5; 146-159.

- HUTTON, C.O. and TAFT, W.H.; 1965.
Weddellite in modern sediments, Florida.
Mineralogical Magazine; London; 34; 256-265.
- IVANOFF, A.; 1972.
Introduction à l'océanographie; Tome 1: Propriétés
physiques et chimiques des eaux de mer.
Vuibert; Paris.
- JONES, B.F. and BOWSER, C.J.; 1978.
The Mineralogy and Related Chemistry of Lake Sediments.
in: A. LERMAN eds; Lakes: Chemistry, Geology, Physics;
Springer-Verlag; New York, Heidelberg, Berlin; 179-235.
- JØRGENSEN, BO. B.; 1983.
The microbial sulphur cycle.
in: W.E. KRUMBEIN eds; Microbiol. Geochemistry; 91-124.
- KELTS, K. and HSÜ, K.J.; 1978.
Freshwater Carbonate Sedimentation.
in: A. LERMAN eds; Lakes: Chemistry, Geology, Physics;
Springer-Verlag; New York, Heidelberg, Berlin; 295-323.
- KHAN, S.R., FINLAYSON, B. and HACKETT, L.R.; 1979.
Scanning Electron Microscopy of Calcium Oxalate Crystal
Formation in Experimental Nephrolithiasis.
Laboratory Investigation; 41; 6; 504-510.
- KOUTSOUKOS, P.G., SHEEHAN, M.E. and NANCOLLAS, G.H.; 1980.
Epitaxial considerations in urinary stones formation. II.
the Oxalate-Phosphate System.
Invest. Urol.; 18; 5; 358-363.
- KRUMBEIN, W.E. and SWART, P.K.; 1983.
The microbial carbon cycle.
in: W.E. KRUMBEIN eds; Microbiol. Geochemistry; 5-62.
- KÜBLER, B.; 1962.
L'Etude de l'Oehningien (Tortonien) du Locle (Neuchâtel -
Suisse).
Thèse; Université de Neuchâtel.
- KÜBLER, B., BETRIK, M.-A. et FAUGUEL, P.; 1979.
Répartition de quelques éléments dans les sédiments de
surface du lac de Neuchâtel, modèle sédimentologique et
géochimique.
Bull. Soc. Neuch. Sciences Nat.; 102; 129-148.
- LAL, D.; 1977.
The Oceanic Microcosm of Particles.
Science; 198; 4321; 997-1009.

LAMBERT, C.E., JEHANNO, C., SILVERBERG, N., BRUN-COTTAN, J.-C. and CHESSELET, R.; 1981.
Log-normal distribution of suspended particles in the open ocean.
J. Marine Res.; 39; 77-99.

LASCARATOS, A.; 1974.
Contribution à l'étude granulométrique des particules en suspension dans l'eau de mer. Essai de différenciation de la granulométrie des particules minérales de celle des particules organiques.
Thèse 3ème cycle; Université de Paris VI.

LEAN, D.R.S. and WHITE, E.; 1983.
Chemical and Radiotracer Measurements of Phosphorus Uptake by Lake Plankton.
Can. J. Fish. Aquat. Sci.; 40; 147-155.

LEAVENS, P.B.; 1968.
New data on Whewellite.
Amer. Mineral.; 53; 455-463.

LEVINSON, A.A., PAZ Y MINO, M., STAMS, U.K. and HARIHORAM, A.; 1985.
The mineralogy of human urinary stones from Calgary, Quito and Honolulu.
American Mineralogist; 70; 630-635.

LOWENSTAM, M.A.; 1968.
Weddellite in a marine gastropod and in Antarctic sediments.
Science; 162; 1129-1130.

LOWENSTAM, M.A.; 1981.
Minerals formed by organisms.
Science; 211; 4487; 1126-1131.

LUCAS, J. et PREVOT, L.; 1984.
Synthèse de l'apatite par voie bactérienne à partir de matière organique phosphatée et de divers carbonates de calcium dans des eaux douce et marine naturelles.
Chemical Geology; 42; 101-118.

MANHEIM, F.T., MEADE, R.H. and BOND, G.C.; 1970.
Suspended Matter in Surface Waters of the Atlantic Continental Margin from Cape Cod to the Florida Keys.
Science; 167; 3917; 371-376.

MANHEIM, F.T., HATHAWAY, J.C. and UCHUPI, E.; 1972.
Suspended matter in surface waters of the northern Gulf of Mexico.
Limnol. Oceanogr.; 17; 1; 17-27.

- MARLOWE, J.J.; 1970.
Weddellite in bottom sediments from the St. Lawrence and Saguenay rivers.
Journal of Sedimentary Petrology; 40; 499-506.
- MATSUBARA, S. and ICHIKURA, M.; 1975.
Weddellite in bottom sediments from the Sea of Japan.
J. Geol. Soc. Japan; 40; 199-201.
- MEADE, R.H., SACHS, P.L., MANHEIM, F.T., HATHAWAY, J.C. and SPENCER, D.W.; 1975.
Sources of suspended matter in Waters of the Middle Atlantic Bight.
Journal of Sedimentary Petrology; 45; 1; 171-188.
- MILLIMAN, J.D., SUMMERHAYES, C.P. and BARRETTO, H.T.; 1975.
Oceanography and suspended matter off the Amazon River February-March 1973.
Journal of Sedimentary Petrology; 45; 1; 189-206.
- MONNIER, F.; 1979.
Corrélations minéralogiques et diagenèse dans le bassin molassique suisse.
Thèse; Université de Neuchâtel.
- NORVELL, W.A.; 1974.
Insolubilisation of Inorganic Phosphate by Anoxic Lake Sediment.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc.; 38; 441-445.
- NRIAGU, J.O. and DELL, C.I.; 1974.
Diagenetic Formation of Iron Phosphates in Recent Lake Sediments.
Am. Mineral.; 59; 934-946.
- NYFFELER, F., WYTENBACH, A., RUCH, P., JAQUET, J.-M. and HANSELMANN, K.; 1984.
The Swiss Oceanographic Research Programm "PROSPER".
Cédra; Technical Report; N° 84-36.
- NYFFELER, F. and GODET, C.-H.; 1986.
The structural parameters of the benthic nepheloid layer in the northeast Atlantic.
Deep-Sea Research; 33; 2; 195-207.
- OTSUKI, A. and WETZEL, R.G.; 1972.
Coprecipitation of phosphate with carbonates in a marl lake.
Limnol. Oceanogr.; 17; 763-767.

PAERL, H.W.; 1975.
Microbial Attachment to Particles in Marine and Freshwater Ecosystems.
Microbial Ecology; 2; 73-83.

PECORA, W.T. and KERR, J.H.; 1954.
Whewellite from a septarian limestone concretion in marine shale near Hovre, Montana.
Amer. Mineral.; 39; 208-214.

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; Nouvelle Série; 155^e édition; 52 pp.

PIERCE, J.W., NELSON, D.D. and COLQUHOUN, D.J.; 1971.
Pyrophyllite and talc in waters off the southeastern United States.
Marine Geology; 11; M9-M15.

POCHON, M.; 1978.
Origine et évolution des sols du Haut-Jura suisse.
Thèse; Université de Neuchâtel.

POKORNI, B.; 1983.
Evolution de l'état sanitaire du lac de Neuchâtel (Baie d'Auvernier) de 1975 à 1980.
Service Cantonal de la Protection de l'Environnement, Canton de Neuchâtel; Rapport Interne.

POKORNI, B.; 1984.
Etat sanitaire du lac de Neuchâtel en 1982 et 1983.
Service Cantonal de la Protection de l'Environnement, Canton de Neuchâtel; Rapport Interne.

PORTNER, C.; 1951.
La formation du sédiment calcaire du lac de Neuchâtel.
Thèse; Université de Neuchâtel.

PRIEN, E.L. and FRONDEL, C.; 1947.
Studies in urolithiasis: I. The composition of urinary calculi.
J. Urol.; 57; 949-991.

QUARTIER, A.; 1948.
Le lac de Neuchâtel.
Mém. SGN; 1; Baconnière; Neuchâtel; 164 pp.

RATHRE, D.E., BLOESCH, J., BURNS, N.M. and ROSA, F.; 1981.
Settling fluxes in Lake Erie (Canada) measured by traps and settling chambers.
Verh. Internat. Verein. Limnol.; 21; 383-388.

REDFIELD, A.C.; 1958.
The biological control of chemical factors in the environment.
Am. Sci.; 46; 205-222.

REDFIELD, A.C., KETCHUM, B.H. and RICHARDS, F.A.; 1963.
The influence of organisms on the composition of sea water.
In: M.N. HILL, eds; The Sea; 2: Interscience; 26-77.

REEBURGH, W.S.; 1982.
A major sink and flux control for methane in marine sediment: anaerobic consumption.
In: K. FANNING and F.T. MANHEIM, eds: The dynamic environment of the ocean floor; Heath, Lexington; 203-217.

RICHOZ, I.; 1986 (Non publié).
Description par l'analyse pollinique de la végétation autour du lac de Neuchâtel, depuis l'Atlantique récent à nos jours.
Licence; Université de Neuchâtel.

RODGERS, A.L. and GARSIDE, J.; 1980.
The nucleation and growth Kinetics of Calcium oxalate in the presence of some synthetic urine constituents.
Invest. Urol.; 18; 6; 484-488.

RODIER, J.; 1978.
L'analyse de l'eau.
Ed. Dunod; Paris.

RÜCH, P.; 1987.
Relations entre suspensions et sédiments actuels dans l'Atlantique NE (45°-49° N, 16°-22° W).
Minéralogie et géochimie des sédiments depuis 13000 ans.
Thèse; Université de Neuchâtel.

SCHELSKE, C.L., STEDMER, E.F., CONLEY, D.J., ROBBINS, J.A. and GLOVER, R.M.; 1983.
Early Eutrophication in the Lower Great Lakes: New Evidence from Biogenic Silica in Sediments.
Science; 222; 4621; 320-322.

SCURFIELD, G., MICHELL, A.J. and SILVA, S.R.; 1973.
Crystals in woody stems.
Bot. J. Linn. Soc.; 66; 277-289.

SHERR, B.F., SHERR, E.B. and BERMAN, T.; 1982.
Decomposition of organic detritus: A selective role for
microflagellate Protozoa.
Limnol. Oceanogr.; 27; 4; 765-769.

SOLLBERGER, H.; 1974.
Le lac de Neuchâtel: ses eaux, ses sédiments, ses courants
sous-lacustres.
Thèse; Université de Neuchâtel.

STEIN, R.; 1984.
Zur Neogenen Klimaentwicklung in Nordwest-Afrika und
Paläo-Ozeanographie im Nordost-Atlantik.
Berichte reports; Geologisch-Paläontologisches Institut der
Universität Kiel; Nr 4.

STERLING, C.; 1965.
Crystal-Structure Analysis of Weddellite, $\text{Ca C}_2\text{O}_4 \cdot (2 + x)\text{H}_2\text{O}$.
Acta Cryst.; 18; 917-921.

STRAUB, F.; 1984.
Note algologique I: Observation de quelques diatomées
(Bacillariophyceae).
Bull. Soc. Neuch. Sciences Nat.; 107; 5-9.

STUMM, W. and MORGAN, J.; 1970.
Aquatic Chemistry.
Wiley Interscience; New York; NY. 563 pp.

STURM, M., ZEH, U., MULLER, J., SIGG, L. and STABEL, H.H.;
1982.
Schwebstoffuntersuchungen im Bodensee mit Interval-
sedimentationsfallen.
Eclog. Geol. Helv.; 75; 3; 579-588.

STURM, M.; 1985.
Particules en suspension dans les lacs.
Mitt./Nouv. EAWAG; 19; 9-15.

TOMAZIC, B. and NANCOLLAS, G.H.; 1979.
The Kinetics of dissolution of calcium oxalate Hydrates.
Journal of Crystal Growth; 355-361.

TUCHOLKE, B.E.; 1974.
Determination of montmorillonite in small samples and
Implications for suspended-matter studies.
Journal of Sedimentary Petrology; 44; 1; 254-258.

VAN DER LINGEN, G.J.; 1979.

Authigenic Weddellite in sediments from the Coral Sea Basin.
Sedimentology; 26; 731-735.

VIEL, M.; 1983.

Etude sédimentologique et géochimique des dépôts récents du
Lac Majeur.

Thèse N° 2083; Université de Genève.

WILLIAMS, J.D.H., SYERS, J.K., SHUKLA, S.S., HARRIS, R.F.
and ARMSTRONG, D.E.; 1971.

Levels of inorganic and total phosphorus in lake sediments
as related to other sediment parameters.
Environ. Sci. Tech.; 5; 1113-1120.

WILLIAMS, J.D.H. and MAYER, T.; 1972.

Effects of sediment diagenesis and regeneration of
phosphorus with special reference to Lakes Erie and Ontario.
In: H.E. ALLEN and J.R. KRAMER, eds: Nutrients in
Natural Waters. Wiley Interscience; New York; NY.

WILLIAMS, J.D.H., MURPHY, T.F. and MAYER, T.; 1976.

Rates of accumulation of phosphorus forms in Lake Erie
sediments.

J. Fish. Res. Board Can.; 33; 430-439.

WÜTHRICH, M.; 1965.

Le phytoplancton du lac de Neuchâtel.
Schweiz. Z. Hydrol.; 28; 1.