

Zeitschrift: Archives des sciences [1948-1980]
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 22 (1969)
Heft: 1

Artikel: Les dépôts du lac Léman : en relation avec l'évolution du bassin sédimentaire et les caractères du milieu lacustre
Autor: Serruya, Colette
Kapitel: 4: Le faciès en relations avec le milieu de dépôt
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-739152>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

QUATRIÈME PARTIE

LE FACIÈS EN RELATIONS AVEC LE MILIEU DE DÉPOT

CHAPITRE PREMIER

VARIATIONS DE QUELQUES FACTEURS CHIMIQUES DANS LES DIFFÉRENTS FACIÈS DES SÉDIMENTS LÉMANIQUES

Nous avons constaté, par l'analyse des argiles et des minéraux lourds et légers, la grande uniformité, dans l'espace et le temps, de la composition minéralogique des sédiments lémaniques. Pendant tout le Postglaciaire, les sources d'apports détritiques n'ont donc guère varié. Cependant, nous avons rencontré, dans l'étude des carottes, de nombreux faciès différents.

Les faciès des sédiments lémaniques et surtout de la partie centrale et occidentale du lac ont en effet été essentiellement déterminés par les variations de l'activité biochimique depuis le dernier retrait glaciaire. C'est une notion que nous avons déjà exposée pour rendre compte du remplacement progressif des carbonates détritiques par les carbonates de néoformation engendrés par l'activité planctonique. Nous allons maintenant y revenir avec plus de détails.

A. Le pouvoir réducteur (P.R.) des sédiments

La matière organique des sédiments qui n'en constitue pondéralement qu'une faible partie, a fait l'objet de nombreux travaux et récemment de déterminations qualitatives. Nous n'avons pas eu la possibilité de disposer de l'appareillage nécessaire, en particulier de colonnes chromatographiques, pour étudier les constituants de la matière organique des sédiments et leurs produits de dégradation.

Nous nous sommes bornés à déterminer leur pouvoir réducteur par la méthode d'Anne qui consiste à mesurer le pouvoir oxydant du bichromate de potassium avant et après son action sur le sédiment. Les résultats ont été exprimés en poids de substances réductrices pour 100 g de sédiment sec. Les résultats obtenus par cette méthode sont quelquefois présentés comme des teneurs en carbone organique il est plus exact de parler de pouvoir réducteur car outre le carbone organique, bien d'autres substances peuvent réduire le bichromate.

1° Variations du P.R. le long des carottes

Le P.R. décroît d'une façon générale lorsqu'on s'éloigne des niveaux actuels en remontant la série postglaciaire. Les variations ne sont pas toujours régulières; il y a quelquefois des changements très rapides et l'on peut dire que chaque période

est caractérisée par une teneur assez spécifique en substances réductrices. Pour chaque carotte et dans la mesure où le permettait le dessin, la courbe du P.R. a été représentée à côté de la coupe lithologique (Fig. 8 à 17).

De la confrontation systématique des courbes du P.R. et des datations palynologiques, on peut dresser le tableau suivant aisément vérifiable sur les diagrammes:

Subatlantique	1,0%
Subboréal	1,0 à 1,5%
Atlantique	1,0%
Boréal	0,5 à 0,7%
Préboréal	0,4 à 0,5%
Dryas	0,2 à 0,5%

Les moyennes précédentes ont été déterminées d'après un total de 1500 dosages.

Des résultats semblables ont été trouvés par plusieurs auteurs: J.R. VALLENTYNE et Y.S. SWABEY (1955), F.J.H. MACKERETH (1966), B. CZECZUGA (1965), etc... Il semble donc que la variation du pouvoir réducteur dans les carottes obéisse à des facteurs très généraux puisque les lacs d'Angleterre, des Alpes, d'Europe Centrale et des Etats-Unis présentent des variations analogues.

La teneur en carbone d'une couche sédimentaire est régie par la productivité organique à l'époque de dépôt de la couche, par la vitesse de dégradation dans le milieu de dépôt, par la dilution due aux apports de matière minérale, c'est-à-dire par la vitesse de sédimentation ou encore le pouvoir d'érosion du bassin.

Or, nous avons vu que pendant le Post-glaciaire, la vitesse de sédimentation était passée par un minimum à l'Atlantique (— 7.500 à — 4.500 B.P.). Etant donné les hautes fréquences polliniques rencontrées dans les niveaux de cette période, et l'importance de la silve, nous avons pensé qu'une forêt épaisse tapissait les pentes du bassin lémanique. Sous le couvert forestier et à la faveur d'une amélioration climatique non négligeable, la pédogénèse fut certainement très active. La forêt retenait les sols et diminuait l'érosion mais le climat chaud et humide favorisait le lessivage: le lac s'enrichissait ainsi de tous les produits solubles provenant de la décomposition pédogénétique des minéraux ou de la dégradation des matières végétales forestières.

Ce processus joint à la grande intensité du rayonnement augmenta notablement la productivité du lac. L'Atlantique fut donc la période du Post-glaciaire où l'érosion fut minimum et la productivité maximum. L'abondance des algues dans le Léman ne date pas d'aujourd'hui, elle a déjà été plus grande. F. J. H. MACKERETH a également trouvé dans les sédiments des lacs de l'English Lake District une période à vitesse de sédimentation minimum mais il la situe entre — 9.000 et — 5.000 B.P.

En dernière analyse, le facteur très général réglant les teneurs des sédiments en carbone organique est donc le climat dont les modifications entraînent toute une série de réactions en chaîne.

2° Variations du P.R. dans les sédiments actuels

Afin d'étudier les variations du P.R. dans les sédiments actuels, nous avons effectué des dosages sur des carottes courtes (0,20 m environ) prélevées au carottier Mortimer-Jenkins.

Etant donné l'absence de sédiments actuels près des côtes, nous avons fait des prélèvements à des profondeurs supérieures à 20 m. De plus, nous nous sommes assurés par l'analyse palynologique que nous avions affaire à des sédiments actuels. Si les grands carottiers n'arrivent pas à prélever les dix premiers centimètres de sédiments dont la densité est faible, ceux-ci n'échappent pas au préleveur de surface Mortimer-Jenkins. Toutes les observations ont donc été faites sur des sédiments de même âge.

TABLEAU IV

Valeurs du pouvoir réducteur des sédiments actuels
(en %)

Niveaux en cm	Juin 24 m Thonon	Juin 40 m Thonon	Juin 85 m Thonon	Juin 168 m Thonon	Juillet 50 m Lau- sanne	Juillet 64 m Thonon	Juillet 100 m Thonon	Juillet 101 m Lau- sanne	Août 27 m Thonon	Août 60 m Thonon	Août 90 m Thonon
0- 1	2,57	2,53	2,65	2,35		2,86	3,44	2,30	1,96	2,7	1,96
1- 2	2,14	2,05	2,71		2,35	2,67					
2- 3	1,06	1,63					3,20		1,53		1,53
3- 4			2,53	2,32	2,46	2,33		0,97		1,87	
4- 5	1,00	1,21	2,44				3,12		1,07		1,07
5- 6		0,96		2,11		2,20					
6- 7	1,40	1,10	2,56		2,17		2,91	2,12		1,78	
7- 8	1,51	0,96		1,93		1,96			1,35		1,35
8- 9			2,14				2,54			1,81	
9-10				1,93		1,82		1,94			
10-11			1,81				2,33		1,41	1,23	1,41
11-12				1,96	1,77						
12-13				1,81					1,29		1,29

Le tableau n° IV donne les résultats de quelques-unes des mesures. La couche supérieure du sédiment a, en général, un P.R. compris entre 2 et 3%. Les régions côtières ont souvent des teneurs en carbone légèrement supérieures à celles du reste du lac. Mais il est plus intéressant d'étudier la décroissance du Pouvoir Réducteur sous la surface. Si nous faisons les rapports des valeurs du P.R. de la couche 0 cm et de la couche 5 cm, on voit se classer les prélèvements en fonction de la bathymétrie. A 25 m de fond, la décroissance du P.R. est deux fois plus rapide que par 100 m de fond.

Il semble donc que les régions littorales du lac sont plus aptes à oxyder les substances réductrices que les zones profondes.

Des constatations analogues ont été faites par d'autres auteurs pour le littoral marin (D. Q. ANDERSON, 1939).

B. *L'Azote*

L'azote a été mesuré par la méthode du microkjeldahl avec l'appareil de Parnas et Wagner. Les résultats sont exprimés en pourcentage du poids sec du sédiment.

Les valeurs de l'azote des sédiments fins des différentes périodes post-glaciaires peuvent être résumées comme suit:

Subboréal	0,11 à 0,12%
Atlantique	0,08 à 0,10%
Boréal	0,06 à 0,075%
Préboréal	0,05 à 0,06%
Dryas	0,03 à 0,05%

Les moyennes précédentes sont calculées sur un total de 700 analyses.

C. *La relation C/N ou P.R./N*

Les valeurs du carbone et de l'azote dans les sédiments lémaniques sont liées par une relation logarithmique (fig. 20). La pente de la droite est de 0,080 environ. Des relations analogues ont été trouvées par de nombreux auteurs:

S. WAKSMAN (1933), G. ARRHENIUS (1950), K. O. EMERY et S. C. RITTENBERG (1952) etc.: elles ont été comparées par R. G. BADER (1955) qui montre que les pentes des droites logarithmiques sont assez variables. Elles dépendent évidemment de l'environnement.

Dans le Léman, nous voyons d'après la pente de la droite logarithmique, que pour les sédiments riches en matières organiques, le rapport C/N décroît. Les niveaux très riches en matières organiques (2%) correspondent à des sédiments récents qui n'ont encore pas subi une importante dégradation bactérienne. Or, on sait que la démolition bactérienne des produits azotés est plus rapide que celle des produits carbonés. Cela peut expliquer l'augmentation du rapport C/N des niveaux plus « évolués » biochimiquement.

Par ailleurs, au cours des premiers stades de la diagénèse, l'élimination d'une partie de l'eau a pour effet de rapprocher les particules minérales et organiques. Des complexes se forment entre les matières carbonées et l'argile (D. L. LYNCH et al. 1956).

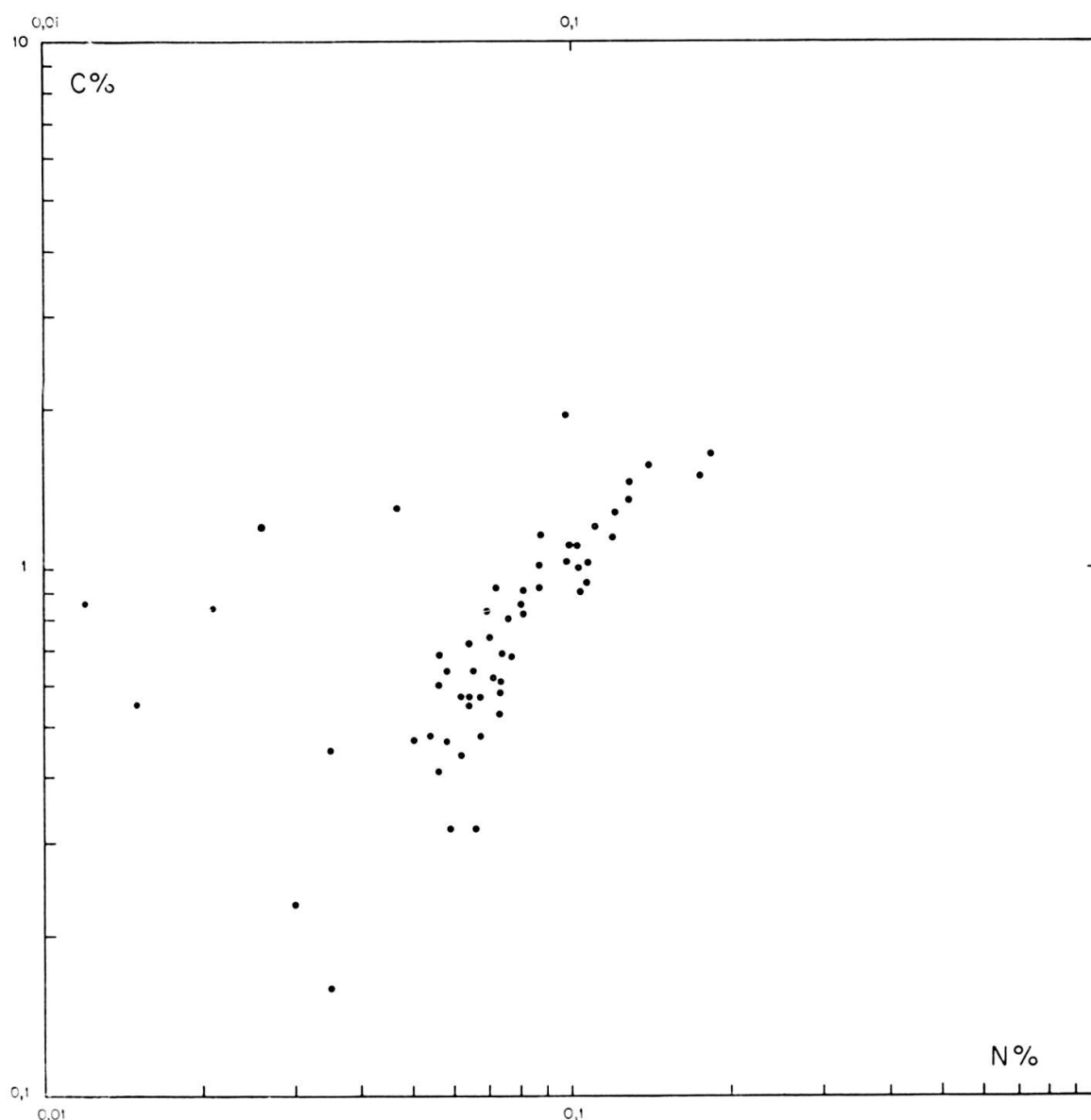


FIG. 20 — Corrélation entre le Carbone organique et l'Azote des sédiments.

La matière organique ainsi liée est beaucoup moins sensible aux attaques enzymatiques (LYNCH D. L. et COTNOIR L. J., 1956). Cette protection est d'ailleurs variable suivant le type d'argile: très efficace avec la montmorillonite, elle est partielle avec l'illite.

D. *Les Sulfures*

De nombreux dosages des formes du soufre ont été faits sur les sédiments des carottes ainsi que sur des prélèvements effectués avec l'appareil de Mortimer-Jenkins.

1^o *Méthode de dosage*

Sulfures libérables par H Cl: 50 gr de sédiments frais sont attaqués par l'acide chlorhydrique sous atmosphère d'azote en présence d'acétate de cadmium.

On dose alors par iodométrie le sulfure de Cd formé,

Les sulfates sont dosés sur le filtrat par le chlorure de baryum,

Le soufre résiduel est attaqué à l'eau régale et dosé au Cl² Ba.

2^o *Résultats*

Il y a toujours une excellente correspondance entre la teneur en sulfures et la couleur du sédiment. De même, entre deux laminæ voisines, la plus noire est toujours la plus riche en sulfures attaquables aux acides. Les résultats obtenus sur deux prélèvements Mortimer-Jenkins, le 20 janvier 1966 sont exprimés en mg de S par kg de matière sèche:

	Par 100 m de fond		Par 38 m de fond
	En surface	A 5 cm	Echantillon homogène
S des sulfures attaquables aux acides	127	1.039	62
S des sulfates	541	144	455
S résiduel	2	2	2

Des dosages analogues sur des prélèvements effectués le 27 octobre 1965 dans les vases de Nantua ont donné les résultats suivants:

	Par 40 m de fond	Par 11 m de fond
S des sulfures attaquables par HCl	3.380	420
Soufre des sulfates	586	660
Soufre résiduel	1.127	1.600

3^o *Conclusions*

Dans le lac Léman la couleur noire de certaines varves est due à la formation de sulfures attaquables aux acides probablement des monosulfures de fer si l'on en juge par la trace rouille que laisse leur oxydation par séchage à l'air.

Dans le Léman aussi bien qu'à Nantua, la vase prélevée par faible profondeur a en surface des teneurs en sulfures bien moindres que celle qui provient des profondeurs plus importantes: pour les profondeurs indiquées le rapport est de deux dans le Léman et de huit à Nantua. Il faudra donc rechercher les raisons qui provoquent une répartition aussi particulière des sulfures.

Dans le Léman par 38 m de fond, les 20 cm de sédiments prélevés étaient tout à fait homogènes. Par 100 m, sous une mince couche (2 cm) beige marron, existe une vase noire et varvée. Le rapport des teneurs en monosulfures entre ces deux niveaux est supérieur à 8. Nous aurons à élucider si les fortes teneurs des niveaux sous-jacents sont originelles ou si les sulfures se sont formés après l'enfouissement.

Les teneurs en S résiduel sont négligeables dans ces niveaux supérieurs du Léman; elles sont importantes dans les niveaux correspondants de Nantua. Ces sulfures qui ne sont attaquables qu'à l'eau régale sont représentés essentiellement par la pyrite. Les conditions du fond du lac à Nantua permettent donc une genèse de la pyrite beaucoup plus aisée que dans le Léman.

CHAPITRE II

ÉTUDE BACTÉRIOLOGIQUE DE QUELQUES PROFILS

Les variations des sulfates dans les dosages précédents donnent à réfléchir; abondants à la surface du prélèvement du Léman de 100 m et dans tout le prélèvement de 38 m, les sulfates se raréfient notablement sous la surface du prélèvement de 100 m. Tout se passe donc comme si les monosulfures particulièrement abondants dans le dernier niveau étaient formés aux dépens des sulfates. Cependant, à Nantua, le niveau riche en monosulfures n'est pas notablement appauvri en sulfates.

Nous avons pensé que l'approche du problème sous l'angle bactériologique apporterait quelques lumières.

A. *Prélèvements*

Le 19 juillet 1965, nous procédâmes avec la Station d'hydrobiologie continentale à des comptages bactériens sur les sédiments du Léman. Lesensemencements furent faits immédiatement après les prélèvements de 1 gr effectués au carottier Mortimer-Jenkins.

B. *Résultats*

Il est bon de souligner que ces dénombrements ont été effectués à une époque où le thermocline étant déjà bien établi, le renouvellement de l'eau du fond est peu important.

	Par 27 m de fond		Par 100 m de fond	
	Bactéries totales	Sulfato- réductrices	Bactéries totales	Sulfato- réductrices
En surface	$7,5 \cdot 10^6$	2.500	$4,5 \cdot 10^6$	25.000
A 5 cm	$0,45 \cdot 10^6$	7		
A 15 cm			$1,15 \cdot 10^6$	150

Les principales observations que ces résultats suggèrent sont les suivantes:

- 1° le nombre total de bactéries en surface est plus grand dans les régions côtières que par 100 m de fond,
- 2° la décroissance du nombre de bactéries sous la surface est beaucoup plus rapide dans le prélèvement côtier.

Ces mesures laissent à penser que dans les régions côtières, en été, l'activité bactérienne de la couche superficielle des vases est plus intense que par 100 m de fond et qu'il s'ensuit un certain épuisement du milieu en matières organiques d'où la rapide décroissance du nombre total des bactéries.

- 3° le rapport 10 existant entre le nombre des sulfato-réductrices des zones côtières et celui des zones profondes ne laisse aucun doute sur le mécanisme de formation des sulfures. Leur décroissance rapide sous la surface suggère que, quand les conditions optima sont réalisées, les sulfato-réductrices vivent à partir des sulfates de l'eau qui se trouve au-dessus des sédiments et pas seulement de l'eau interstitielle. Ceci expliquerait que dans le tableau des mesures des différentes formes du soufre on trouve bien plus de soufre total dans les zones riches en monosulfures que dans les autres.

CHAPITRE III

LE POTENTIEL D'OXYDO-RÉDUCTION DU MILIEU DE DÉPOT

A. *Notion de potentiel d'oxydo-réduction*

Le potentiel d'oxydo-réduction d'un milieu est une notion d'électro-chimie: on étudie certaines propriétés d'un milieu en observant le comportement d'électrodes introduites dans ce milieu.

Nous ne reviendrons pas sur la théorie du potentiel d'oxydo-réduction ou potentiel redox qui a été maintes fois exposée; nous insisterons par contre sur les types de milieu auxquels peut s'appliquer cette notion.

L'habitude s'est répandue en sédimentologie de mesurer le potentiel redox des dépôts récents (C.E. ZOBELL, 1946). On a même pensé pouvoir prévoir, d'après le pH et le potentiel redox, quels minéraux se formeraient au sein d'un sédiment (W.C. KRUMBEIN et R.M. GARRELS, 1952). Cependant, ce terme ne s'applique en toute rigueur qu'à un système qui comprend des électrodes plongeant dans une solution d'électrolytes où existent des ions à valence variable en équilibre d'oxydo-réduction.

Or, un sédiment est bien autre chose:

il contient plusieurs phases: des minéraux solides, une solution interstitielle et des gaz dissous ou non dissous,

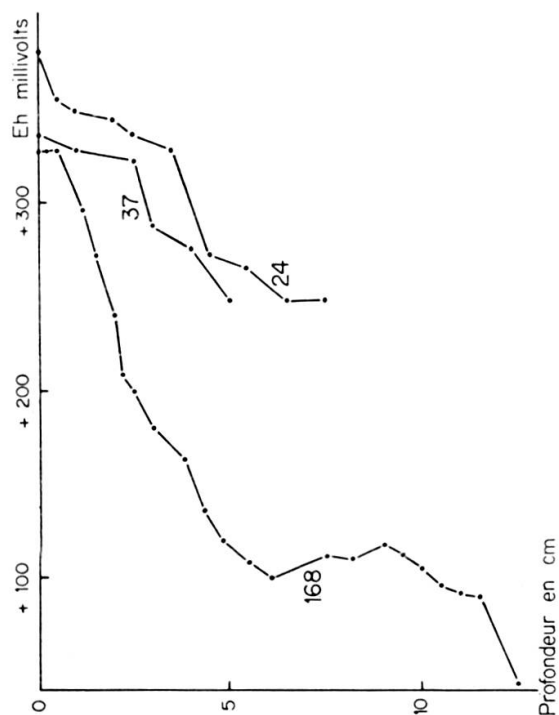
si dans ce complexe existent bien des ions à valence variable tels que Fe, Mn, Cr..., ils sont loin de figurer à l'état d'ions simples comme dans une solution d'électrolyte diluée. On sait en particulier que ces métaux entrent en combinaisons encore assez mal définies avec des matières organiques et leur comportement n'est pas obligatoirement celui qui est prévu dans les conditions où a été élaborée la théorie. Par ailleurs, d'autres systèmes redox organiques tels la famille des quinones entrent également en jeu.

Il s'ensuit que les phénomènes qui interviennent aux alentours de l'électrode de platine ne sont plus du tout ceux qui ont lieu dans le cas d'une solution simple d'électrolytes. Cela nous explique pourquoi les mesures de tension d'oxydoréduction dans les sédiments sont si difficiles à réaliser et souvent si peu reproductibles. D'un autre côté, si on ne leur demande pas une grande précision, ces mesures ont une signification physique indéniable.

A notre avis, nous ne pouvons pas mesurer la tension redox, au sens classique du terme, d'un dépôt sédimentaire. Cependant, en introduisant une électrode de platine dans ce milieu complexe on mesure une certaine tension qui dans certains cas est interprétable. Il reste à faire la théorie de cette mesure et des phénomènes électrochimiques très complexes et nombreux qui ont lieu au niveau de l'électrode de platine. Dans l'état actuel des connaissances, nous nous sommes contentés de rechercher empiriquement les meilleures conditions de reproductibilité des mesures.

B. Résultats

En 1964, S. SERRUYA (P. VIVIER et S. SERRUYA 1966) a pu mettre en évidence dans l'eau du lac de Nantua, une zone à potentiel négatif comprise entre deux zones à potentiel positif et put vérifier ensuite que cette zone était dépourvue d'oxygène. Dans le Léman des essais de mesure in situ avec le même appareillage ne donnèrent jamais de valeurs cohérentes. Les mesures du potentiel d'oxydo-réduction de l'inter-



Légende : 40 = profondeur des prélèvements

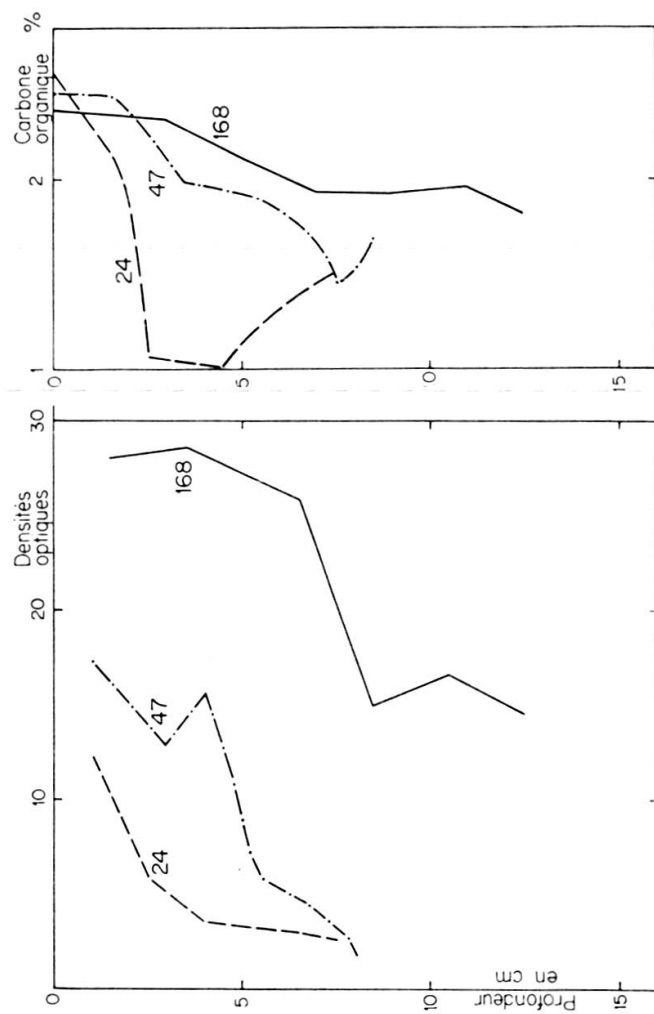
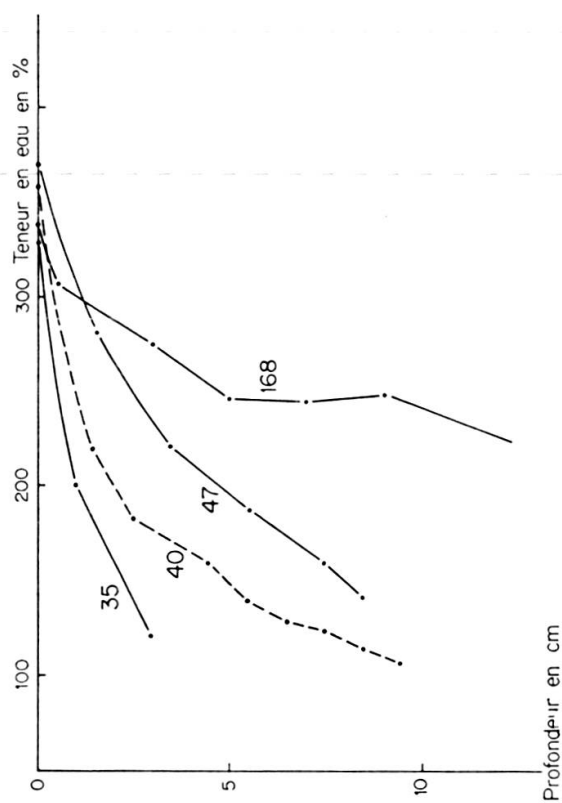


Fig. 21. — Teneur en eau, potentiel redox, densité optique des sédiments en fonction de la bathymétrie, Les nombres figurant sur les courbes indiquent la profondeur des prélèvements.

face vase-eau furent donc faites en laboratoire sur des colonnes Mortimer-Jenkins aussitôt après le prélèvement.

Nous avons observé des variations significatives de ce potentiel en fonction de la bathymétrie. Notons que nos prélèvements furent tous effectués au-delà de 20 m afin de rencontrer des sédiments actuels.

La figure n° 21 représente la série d'observations qui a pu être faite le 10 juin 1965. Nous constatons qu'à mesure qu'on se rapproche des rivages :

- a) Dans les régions côtières, le potentiel redox du sédiment augmente et sa décroissance sous la surface de la vase est beaucoup plus lente.
- b) La teneur en eau du sédiment diminue vers la côte. Il en est de même pour la teneur en carbone.
- c) Les pigments solubles dans l'alcool éthylique ont été extraits à plusieurs niveaux des prélèvements. Les densités optiques mesurées correspondent aux pigments contenus dans 10 g de sédiments. Les prélèvements côtiers ont une densité optique de surface plus faible et la décroissance depuis la surface vers le fond des carottes y est beaucoup plus grande.
- d) Enfin, les sédiments côtiers sont de couleur plus claire que les autres et ne présentent pas de varves. Nous savons que ces particularités sont dues à une moins grande abondance en monosulfures de fer.

S. Serruya a mené une étude analogue dans les sédiments du lac de Nantua : en dépit des conditions d'eutrophisation très avancées à Nantua, les sédiments côtiers présentent aussi une minéralisation plus importante que les sédiments profonds (C. SERRUYA et S. SERRUYA, 1966).

Nous pouvons donc énoncer la conclusion suivante :

Les vases côtières des lacs, présentant par rapport aux vases du large,
des températures moyennes plus importantes,
des potentiels redox plus élevés,
des populations bactériennes aérobies plus nombreuses mais des colonies sulfato-réductrices restreintes,
forment une bande littorale de sédiments clairs, homogènes, pauvres en sulfures et ayant des propriétés mécaniques tout à fait particulières.

Ceci est le schéma théorique qui serait entièrement vrai en pratique si les lacs étaient dans des conditions physiques et chimiques invariables. Or, les milieux naturels étant en transformation permanente, il nous reste à envisager la dynamique des relations du milieu avec le dépôt.

CHAPITRE IV

LA DYNAMIQUE DES LIAISONS
ENTRE LE MILIEU ET LE DÉPOT SÉDIMENTAIREA. *Influence des variations saisonnières de la productivité
et formation des varves d'oxydo-réduction*1° *Zones profondes*

Nous avons vu que la productivité organique passe par des maxima à certaines époques de l'année: en Janvier, elle est environ 15 fois plus faible qu'en Avril. Dans le Léman, c'est au mois d'avril qu'a lieu le maximum de productivité. L'intense consommation du CO_2 des eaux superficielles provoque la précipitation de carbonate de calcium qui parfois rend l'eau laiteuse. Son dépôt sur le fond est favorisé par la faible teneur à ce moment en CO_2 des eaux profondes. Ce mécanisme aboutit à la formation d'une couche blanche dont l'épaisseur est fonction de la productivité et de la teneur des eaux superficielles en bicarbonates.

En été, malgré l'intense catabolisme qui a lieu dans les eaux superficielles les particules qui atteignent le fond sont plus riches en matières organiques que pendant l'hiver. Cette micro-couche organique va évoluer essentiellement en fonction du potentiel redox du milieu et des populations bactériennes. Dans les régions oxydantes les substances azotées et carbonées sont détruites ou au moins transformées à l'état d'acides aminés ou de sucres simples. Même les pigments comme nous l'avons vu sont rapidement attaqués. Au contraire, le dépôt du plancton mort dans des conditions réductrices va entraîner soit sa conservation totale, soit sa transformation partielle par les fermentations anaérobies: dans ce dernier cas, la grande famille des sulfato-réductrices va utiliser une partie de la matière organique pour ses propres synthèses en libérant un déchet sulfuré qui en entrant en combinaison avec le fer va donner les monosulfures de fer.

Une bonne partie cependant des matières organiques est peu transformée. J.R. VALLENTYNE (1957) a extrait des caroténoïdes dans des sédiments lacustres vieux de 20.000 ans. Cet auteur pense que « the reducing sedimentary environment was probably the main factor permitting this preservation ».

Dans le Léman, la période printemps-été de maximum planctonique coïncide avec un relatif déficit d'oxygène des zones profondes. Les matières organiques d'été les plus abondantes, vont donc évoluer dans ces zones selon le processus que nous venons de décrire et formeront une lamina noire.

En septembre, nouvelle poussée planctonique et nouvelle précipitation de carbonate de calcium mais cette fois il est possible que les fortes teneurs en CO_2 du fond empêchent la formation d'une nouvelle couche blanche.

En hiver, la matière organique étant rare et l'oxygène abondant, il se dépose une couche essentiellement minérale de couleur gris-bleu clair.

Le nombre de micro-couches caractérisant un cycle annuel va donc dépendre :
du nombre de pics de productivité dans l'année
des conditions redox du milieu et par conséquent du climat
de la quantité de calcium disponible dans l'eau

Le nombre des couches peut varier de 2 à 4.

Dans le Léman, les couches franchement blanches sont rares : nous en avons cependant observé à plusieurs reprises par exemple dans la carotte L 63, niveau 354 à 355,5 cm où on a la succession suivante : couche noire — couche blanche (5 mm) — couche noire (1 à 2 mm) — couche grise (5 mm) — couche blanche (5 mm) — couche noire (2 mm).

A Nantua, au contraire, les couches blanches sont nettes, bien individualisées et contiennent 90% de CO_3Ca alors que les couches noires ou grises n'en contiennent pas plus de 40%. Or, à Nantua, la productivité est cinq fois plus forte que dans le lac Léman.

2° Zones littorales

Comme nous l'avons vu, ces régions n'ont jamais un grave déficit en oxygène : la matière organique y subit une attaque aérobie rapide. Il ne se forme dans ces zones que des couches grises ou blanches d'où la couleur généralement plus claire des dépôts côtiers.

En résumé, nous pouvons dire que dans les cas étudiés le faciès est grossièrement fonction de la bathymétrie du dépôt.

B. *Influence des variations climatiques de différents ordres*

L'hiver 1963 fut particulièrement rude et long : on observa que le Léman avait emmagasiné plus d'oxygène (R. MONOD, 1965) et que l'été suivant les déficits étaient moins marqués. Si on imagine un refroidissement progressif par allongement des hivers, on verrait s'étendre vers le large les caractéristiques de la zone littorale, et alors, les sédiments homogènes de couleur claire deviendraient la règle. Lorsque la température serait assez basse toute l'année pour que la stratification thermique des eaux soit restreinte dans le temps, la circulation de l'eau et le renouvellement en oxygène seraient quasi permanents : tous les sédiments seraient de type clair et homogène. Ceci est d'ailleurs parfaitement vérifié dans les sédiments du Dryas et du Préboréal.

Si aucune autre influence n'avait joué on pourrait donc espérer retracer, par l'étude de la répartition spatiale des sédiments non varvés, soit des variations du

niveau du lac en climat stable, soit des variations climatiques avec un niveau lacustre stable, soit à la fois des variations de niveau du lac et des variations climatiques.

Ainsi dans certaines carottes profondes du Léman, l'existence d'un niveau non varvé compris entre deux niveaux varvés pourrait signifier qu'à l'époque du dépôt de cette formation, la zone de prélèvement était littorale ou bien soumise à un climat beaucoup plus froid. En fait, l'interprétation de ces zones non varvées est beaucoup plus délicate en raison des autres facteurs qui ont pu intervenir.

C. Influence de la vitesse de sédimentation

Si, dans un milieu aqueux parfaitement oxydant, la vitesse de sédimentation est trop forte, la matière organique déposée ne reste pas assez longtemps dans la zone biologiquement active pour subir les dégradations que laisseraient prévoir le potentiel d'oxydo-réduction du milieu.

CHAPITRE V

LES ÉLÉMENTS TRACES

De nombreux éléments se trouvent dans les sédiments en très faibles quantités (moins de 500 mg/kg). Malgré leurs teneurs restreintes, ils jouent un rôle important comme par exemple dans les phénomènes biologiques au cours des réactions enzymatiques.

Le plancton aquatique concentre beaucoup dans ses tissus, les éléments traces de l'eau. Nous n'avons pas fait de dosages de ces éléments dans l'eau du Léman mais tous les auteurs s'accordent pour trouver entre l'eau et le plancton des facteurs de concentration très élevés: 1.10^6 pour le cobalt, 4.10^4 pour le zinc, 6.10^4 pour le cuivre (lac de Windermere, F. J. H. MACKERETH, 1966). Des dosages effectués sur le plancton du Léman donnent en ppm les résultats suivants:

Pb: 27, Zn: 190, Cu: 25, Cr: 35, Ni: 27,
Sr: 108

Le fond du lac reçoit d'une part le plancton mort et d'autre part les matériaux érodés des versants. Les teneurs en éléments traces des sédiments vont donc dépendre de ces deux sortes d'apports. De plus, ces éléments sont très sensibles aux conditions qui règnent dans le milieu de dépôt (en particulier les conditions d'oxydo-réduction) et leur distribution dans le sédiment est une précieuse indication.

Nous avons fait deux sortes d'échantillonnages:

- 1) un échantillonnage de surface de façon à étudier les variations de concentration des éléments traces en fonction de la bathymétrie,

- 2) un échantillonnage dans les carottes pour examiner la distribution des éléments traces à travers le Post-glaciaire.

Les analyses furent effectuées au quantomètre du laboratoire de Géochimie de la Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine, sous la direction de G. KULBICKI.

A. *Les éléments traces dans les sédiments actuels*

Deux séries de prélèvements effectués l'une en Octobre 1965, l'autre en avril 1966 firent l'objet d'analyse pour 12 éléments: B, V, Ni, Cu, Cr, Ba, Co, Zn, Mo, Ga, Sr, Pb. Les analyses furent répétées à plusieurs jours d'intervalle ce qui permit de constater la très bonne reproductibilité des résultats.

A chaque station, deux échantillons furent prélevés, l'un correspondant au sédiment de surface, l'autre se trouvant à un ou deux centimètres sous la surface. Des analyses identiques ont été réalisées à Nantua et sont comparées à celles du Léman.

Les résultats obtenus par les deux séries d'analyses sont très voisins, en particulier les concentrations d'éléments à certains niveaux sont toujours parallèles dans les deux séries. Le tableau n° V représente les moyennes des mesures de la première série. Les teneurs sont exprimées en ppm ou encore en micro-grammes par gramme.

LÉMAN

Nous pouvons comparer ici un niveau de surface et un niveau sous la surface d'un échantillon prélevé par 30 m de fond avec les niveaux correspondants d'un échantillon prélevé par 220 m.

1° *Différence de concentrations*

- a) Certains éléments ont des teneurs voisines dans ces quatre niveaux: Ni, Ba, Co, Mo, Ga;
- b) Le B et le V ont des concentrations plus élevées dans l'échantillon 30 m que dans l'échantillon 220 m. A 30 m, la concentration en B et V est plus grande sous la surface qu'à l'interface même. Le Pb est au contraire légèrement plus abondant en surface qu'au dessous dans l'échantillon de 30 m. La différence, bien que faible, a été nettement confirmée par la seconde série d'analyses. A 220 m, la teneur est identique pour les deux niveaux;
- c) Le Cu et le Zn sont, à 30 m aussi bien qu'à 220 m, plus concentrés en surface qu'en profondeur;
- d) Le Cr est plus abondant en surface à 30 m mais à 220 m, le niveau de surface est plus pauvre que le niveau profond;

TABLEAU V

Les éléments traces dans les sédiments actuels

Unités : ppm

	B	V	Ni	Cu	Cr	Ba	Co	Zn	Mo	Ga	Sr	Pb
Léman 30-0	140	125	80	135	170	360	28	150	5	26	90	20
Léman 30-1	162	161	85	30	147	370	29	91	5	31	102	13
Léman 220-0	120	125	88	89	168	340	30	117	4	27	76	20
Léman 220-1	113	118	88	56	215	326	27	108	4	25	83	20
Nantua 15-0	223	220	71	81	175	185	36	165	7,5	34	60	45
Nantua 15-1	214	243	129	190	240	185	41	182	8,0	36	77	45
Nantua 40-0	201	220	132	210	249	155	30	171	5,0	32	57	32
Nantua 40-1	200	215	73	78	135	170	29	143	7,0	36	65	25
Plancton Léman				25	35			190			108	27
Plancton Nantua				8	7			25			17	3
Non marine shales Crétacé sup. (TOURTELOT)	78-99	101-93	32-19	29-22	59-52		12-10	83-77	1,3-1,6	19-20		23-26
Sédiments lacustres actuels (MACKE- RETH) Windermere Lake Esthwaite Lake Ennerdale Lake	11		55 52 19	83 28 30			22 38 18	200 190 105				

2° Comparaisons avec les teneurs mesurées dans d'autres séries sédimentaires lacustres

Le bore offre dans les lacs étudiés des valeurs très élevées si on les compare aux valeurs trouvées par d'autres auteurs dans certaines séries lacustres. La moyenne pour les sédiments lémaniques est de 134 ppm. H. A. TOURTELOT (1964) obtint, pour des argiles lacustres du Crétacé supérieur de l'Ouest des Etats-Unis des teneurs moyennes allant de 78 à 99 ppm suivant la teneur en carbone.

Plusieurs auteurs ont insisté sur le parallélisme qui existe entre la teneur en éléments traces d'un sédiment et sa teneur en argile ainsi que la nature de celle-ci. HARDER (1961) a pu montrer que dans le matériel qu'il a étudié, le bore était contenu pour une grande partie dans l'illite de la fraction argileuse. Si l'on songe que les échantillons étudiés par TOURTELOT sont beaucoup moins riches en illite que les nôtres, on a peut être là l'explication de la différence observée. En fait, nos valeurs se rapprochent davantage de celles qui ont été rapportées par TOURTELOT pour les séries marines (112 à 133 ppm). Comme les sédiments que nous avons prélevés sont des dépôts actuels en milieu très pauvre en électrolytes, il faut bien supposer que ces fortes teneurs sont liées à la composition minéralogique des échantillons.

Tous les autres éléments mesurés dans les sédiments lémaniques ont des teneurs nettement supérieures aux moyennes de TOURTELOT pour les séries lacustres du Crétacé supérieur et légèrement plus élevées que les valeurs trouvées par MACKERETH dans les sédiments post-glaciaires des lacs du Lake District (Angleterre).

NANTUA

Nous comparerons deux niveaux, l'un à l'interface, l'autre sous la surface, d'un échantillon prélevé par 15 m de fond avec les deux niveaux correspondants d'un échantillon de 40 m, profondeur maximum du lac de Nantua.

1° Concentrations comparées des différents niveaux

V, Ni, Cu, Cr, Co, Zn et Sr sont, pour l'échantillon 15 m plus abondants sous la surface qu'à la surface même. Dans l'échantillon 40 m, Ni, Cu, Cr, Zn et Pb ont un comportement inverse.

2° Valeurs absolues et comparaisons avec les teneurs d'autres séries lacustres

Tous les éléments ont des teneurs plus élevées dans les sédiments de Nantua que dans ceux du Léman et naturellement beaucoup plus élevées que dans les séries de TOURTELOT et de MACKERETH. Cependant, les teneurs en Co et en Zn des sédiments de Nantua sont assez voisins de celles qui ont été observées à Esthwaite Lake (Angleterre). Les deux lacs ont en commun une très haute productivité organique ainsi que des conditions d'eutrophie assez sévères.

Discussion des résultats

Les résultats que nous avons obtenus posent deux problèmes:

quelle est la raison des teneurs relativement élevées?

quel est le mécanisme responsable des différences de teneurs observées — surtout à Nantua — à des bathymétries différentes et des enrichissements qui se produisent soit à l'interface soit sous celui-ci.

1° Les valeurs absolues des teneurs

Ce problème nous oblige à poser la question de l'origine des éléments traces se retrouvant dans les sédiments. Leurs sources sont en fait multiples:

éléments traces arrivant au lac avec les matières organiques terrestres entraînées par lessivage

éléments traces arrivant au lac avec la fraction minérale provenant de l'érosion du bassin versant

éléments traces provenant des organismes qui se sont synthétisés dans le milieu

éléments traces qui étaient contenus dans l'eau du lac et qui ont été absorbés par des minéraux hérités ou de néoformation.

Il serait très intéressant de pouvoir distinguer quel est, dans les cas qui nous occupent, le facteur dominant. Malheureusement, il ne nous a pas été possible de faire un échantillonnage représentatif des bassins versants. Nous pouvons cependant faire les constatations suivantes:

nous voyons dans le tableau n° V que les teneurs du plancton de Nantua sont beaucoup plus faibles que celles du plancton du Léman. Bien que la productivité soit beaucoup plus élevée à Nantua, il est peu probable que la différence des teneurs entre les deux lacs soit due au plancton lacustre;

le lac de Nantua est beaucoup plus eutrophe et présente des conditions de dépôts beaucoup plus réductrices que le Léman. Or, comme nous l'avons vu, précédemment, les milieux réducteurs sont favorables à l'accumulation dans le sédiment de tous les éléments liés à la matière organique. En effet, celle-ci est enfouie sans être minéralisée, et par conséquent ne relâche pas dans l'eau interstitielle puis dans le milieu lacustre les métaux qu'elle a absorbés ou qui font partie de sa constitution même. Enfin, la formation de nombreux sulfures qui montrent une très grande aptitude à fixer les éléments traces de la matière organique et des argiles qui les entourent, est une raison supplémentaire pour expliquer les valeurs élevées de Nantua;

la composition minéralogique de la fraction argileuse des sédiments des deux lacs semble favorable à la concentration des oligo-éléments.

Les sédiments lémaniques étudiés contiennent environ 20% de CO^3Ca et 15% de quartz et feldspaths; la fraction argileuse représente donc environ 65% du sédiment. Elle se compose en moyenne de 50% de chlorite et de 50% d'illite; la montmorillonite est présente dans certains échantillons à l'état de traces, la kaolinite n'a pas été rencontrée. Les sédiments de Nantua présentent 40% de CO^3Ca et 15% de quartz et feldspaths et 55% d'argile. Cette fraction argileuse se compose de 30% de kaolinite, 30% d'illite et 40% de montmorillonite.

D'après les travaux de HARDER (1961) l'illite serait l'argile qui concentrerait le plus les oligo-éléments. Les importantes teneurs de nos sédiments et des argiles glaciaires en illite et à un moindre degré en montmorillonite nous semblent être la raison essentielle des différences constatées avec les résultats d'autres auteurs: les shales non marines étudiés par TOURTELOT avaient une teneur moyenne en argile de 50 à 80% et celle-ci était formée pour 50% de kaolinite et pour 50% d'illite et de montmorillonite.

Les conditions idéales pour concentrer dans les sédiments les éléments traces sont donc les suivantes:

une fraction argileuse importante contenant une forte proportion d'illite ,
une haute teneur en matière organique
un milieu réducteur

2° Répartition des éléments traces en fonction de la bathymétrie

Il va sans dire que tous les facteurs précédemment cités vont jouer un grand rôle mais le plus important semble revenir aux conditions d'oxydo-réduction. Or, si dans le Léman les conditions réductrices ne sont jamais très stables ni durables, à Nantua par contre, les zones centrales profondes du lac sont dépourvues d'oxygène de juin à décembre (SERRUYA S., ROMANENS M. et ORAND A. 1965). En juillet, par 40 m de fond, il n'y a plus d'oxygène du tout et le potentiel Redox tombe à 0 millivolt et devient même franchement négatif; cette situation ne cesse qu'au mois de janvier lors de la circulation hivernale. Par 15 m de fond, le taux de saturation en oxygène ne tombe pas au-dessous de 30%. Dans le Léman, aux mois d'octobre et novembre, le taux d'oxygène est de 80% à 50 m et de 40% à 300 m: à la fin de l'été et en automne, les conditions Redox par 300 m sont à peu près celles qui règnent à Nantua par 15 m à la même époque.

B. Les éléments traces dans les sédiments postglaciaires du Léman

Les carottes, datées par les analyses polliniques, ont fourni le matériel nécessaire à une analyse de la répartition des éléments traces au cours du Post-Glaciaire.

Le tableau n° VI donne les résultats des analyses, classés d'après la position chronologique des échantillons. Lorsqu'il existe deux valeurs pour un niveau, le

TABLEAU VI

Les éléments traces dans la série postglaciaire

Unités : ppm

	B	V	Mo	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	Co	Sr	Ga
<i>Actuel- Subatlantique- Subboréal</i>											
170 m de fond											
1	175 155	174 166	001	009	115	33 80	206 212	102 160	21 37	104	28
2	135 126	164 158	002	010	120	034 105	223 215	105 162	25 35	102	26
3	127 124	158 146	002	006	118	033 105	215 217	094 160	019 032	112	024
4	134 134	164 144	002	008	105	034 075	224 212	97 177	020 043	122	025
194 m de fond											
1	162 146	172 162	001	012	127	063 104	218 203	101 168	023 041	101	026
2	154 180	189 180	002	011	093	075 098	213 230	091 190	019 038	155	028
3	138 146	174	002	008	109	034 092	219 230	105 175	025 035	135	030
4	136 140	170	001	009	116	061 085	206 202	085 170	021 032	166	025
80 m de fond	148 144	169	002	009	103	023 082	207 195	094 158	022 038	131	028
100 m de fond	163 167	185 155	003	016	130	038 090	210 220	112 150	027	138	032
56 m de fond	145 156	171	002	009	120	056 060	226 205	121 164	025 034	105	031
Moyennes (fraction argi- leuse)	147	178		10,8	115	45	217	102	23	120	—

TABLEAU VI (suite)

	B	V	Mo	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	Co	Sr	Ga
<i>Atlantique</i>											
65 m de fond 1	170 158	179 168	002	008	096	018 173	180 225	082 153	0,20	150	031
2	187 172	195	001	013	103	024 077	196 206	076 158	014	158	026
194 m de fond	155 155	169	001	006	094	020 080	185 182	071 128	018 037	144	027
Moyennes (fraction argi- leuse)	174	181		5,6	9,8	20	187	76	17	150	
<i>Boréal</i>											
80 m de fond 1	179 162	186	002	007	100	022 065	193 156	075 130	017 042	142	027
2	194 197	189	003	010	101	037 074	186 173	087 132	021 037	123	031
Moyennes (fraction argi- leuse)	186	187	02,5	9,5	100	29	189	81	19	133	
<i>Préboréal</i>											
10 m de fond 1	164 148	158 140	002	008	095	119 170	180 170	077 163	014 059	114	025
2	199 188	195 180	003	020	115	064 132	256 227	027 036	115	055	030
3	137 142	167	005	005	101	031 163	212 182	105 121	017 039	122	027
4	198 180	196	002	011	097	042 077	202 193	095 140	020 033	110	032

TABLEAU VI (suite)

	B	V	Mo	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	Co	Sr	Ga
<i>Préboréal</i> (suite)											
21 m de fond 1	181	182	005	003	121	037 078	186 175	080 171	018	121	029
2	195 201	200	004	015	102	050 074	213 227	097 184	020	129	031
56 m de fond	187 152	216	003	006	127	032	220 200	138 138	031 028	101	034
32 m de fond 1	174 200	209 200	003	014	127	031 089	221 257	132 182	029 028	106	034
2	151 175	204	003	016	116	047 077	222 220	122 198	025	117	030
26 m de fond	146	165	003	007	104	039 067	190 180	092 151	022 032	113	028
Moyennes (fraction argi- leuse)		192		16	112	42	215	107	23	113	
<i>Dryas</i>											
10 m de fond 1	220	202	003	012	144	034 300	202 185	112 140	025 032	123	035
2	194	213	002	012	105	048 148	219	099 134	023 035	121	031
3	203	202	002	011	105	047 142	206 215	099 143	020 028	121	030
4	198	204	002	014	115	045	207	102	025	123	033
26 m de fond	209 210	191	001	011	145	037 110	211 181	093 141	020 034	101	031
56 m de fond	179	200	003	015	142	048 086	223 220	133 162	030 038	096	033
Moyennes (fraction argi- leuse)	200	202		12,5	126	43	211	106	24	114	

second correspond aux teneurs de la roche totale; le premier nombre, et dans certains cas le seul, correspond aux teneurs de la fraction argileuse.

1^o Principales caractéristiques

- a) Les doubles déterminations à la fois sur la roche totale et sur la fraction argileuse permettent de montrer que certains éléments sont en presque totalité inclus dans la seule fraction argileuse. Tels sont le Bore, le Vanadium, le Chrome et le Cobalt. Par contre le Cuivre et le Nickel existent aussi bien dans l'argile que dans les carbonates;
- b) Si on essaye de déterminer, pour chaque élément, des groupes de valeurs homogènes, on voit que les coupures qu'on est amené à pratiquer correspondent assez bien aux coupures climatiques;
- c) En faisant les moyennes des valeurs de chaque groupe climatique, on constate que les teneurs de la plupart des éléments décroissent pendant les périodes Atlantique et Boréal, en particulier Cu, Ni, Cr, Pb, Zn. Seul le Strontium augmente. Par contre, le Bore et le Vanadium décroissent régulièrement depuis le Dryas jusqu'à l'Actuel. Il est dommage que nous ne possédions que trois niveaux correspondant à la période atlantique mais leurs teneurs sont systématiquement différentes des périodes qui les précèdent et de celles qui les suivent.

2^o Détails des mesures

BORE ET VANADIUM

Le Bore passe d'une valeur moyenne de 200 ppm au Dryas à 175 au Préboréal, 170 à l'Atlantique et 147 au Subatlantique-Subboréal-Actuel. De même, le Vanadium passe aux périodes correspondantes par les valeurs suivantes: 202 ppm, 192 ppm, 187 ppm, 181 ppm, 178 ppm.

Il est intéressant de noter que le Bore et le Vanadium ne sont pas liés à la matière organique car la courbe de ces éléments en fonction du temps est exactement inverse de la courbe de Carbone organique. On pourrait penser, comme le suggère E. GORHAM (1958) que le bore principalement transporté par les vents océaniques serait un indice de « l'océanité » du climat ainsi que de la vitesse des vents et de la fréquence de la pluie. Dans le cas du Léman, cette hypothèse expliquerait la décroissance graduelle du bore depuis le Dryas à précipitations abondantes jusqu'à l'Actuel.

Dans ce cas, l'enrichissement aurait eu lieu par l'action des pluies sur le bassin versant et le lessivage continuél amènerait une décroissance graduelle du Bore dans les eaux et les sédiments érodés.

MACKERETH a déterminé les teneurs du bore sur plusieurs carottes des lacs du Lake District: il n'obtient pas une variation parallèle à la nôtre. Il est vrai que la

région des lacs est entourée de terrains primaires et non de moraines. De plus les valeurs trouvées par cet auteur ne dépassent pas 10 ppm.

Il ressort de ces comparaisons que les teneurs en bore et en vanadium semblent dépendre essentiellement des roches du bassin versant et de l'intensité du drainage. C'est une autre question de savoir si les roches du bassin versant ont été enrichies en ces éléments par certaines variations climatiques.

CUIVRE, NICKEL, CHROME, COBALT, PLOMB ET ZINC

La diminution de ces éléments pendant l'Atlantique semble être liée à la diminution de la vitesse de sédimentation que nous avons constatée pendant la même période. Là encore des questions de drainage du bassin, d'intensité de lessivage prévaudraient sur les modifications provoquées dans le milieu de dépôt lui-même. Il faut d'ailleurs ajouter que les deux types d'actions sont très liées: en effet, si le drainage diminue à une époque déterminée, la vitesse de sédimentation diminue également et de nouvelles conditions s'installent dans le milieu de dépôt.

3^o *Conclusions*

Cette première série d'analyses qui ne peut apporter de conclusions définitives met en évidence les phénomènes suivants:

l'étude des sédiments actuels permet de voir le rôle que jouent, dans un lac, les conditions physiques, chimiques et biologiques du milieu;

en analysant toute la série postglaciaire, il apparaît que la composition minéralogique des roches du bassin, l'intensité du drainage dont dépend la vitesse de sédimentation sont des facteurs nettement prépondérants. L'intensité du drainage dépendant de facteurs climatiques; les modifications qu'elle a entraînées devraient donc se retrouver dans tous les lacs d'une même région. Par contre, les très grandes différences dans la composition lithologique des bassins versants entraîneront des variations importantes dans les teneurs absolues des sédiments en éléments traces.

Il apparaît donc fondamental de faire ce type d'études sur plusieurs lacs où on aura étudié également le bassin versant et les conditions de drainage. C'est de la comparaison de nombreux résultats qu'on apprendra les mécanismes de répartition des éléments traces. En retour, on aura alors un instrument très intéressant pour retracer les conditions paléogéographiques concernant les lacs.