

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

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

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 29.01.2026

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

LES DÉPOTS DU LAC LÉMAN EN RELATION AVEC L'ÉVOLUTION DU BASSIN SÉDIMENTAIRE ET LES CARACTÈRES DU MILIEU LACUSTRE

PAR

Colette SERRUYA *

PRÉAVIS

Conformément aux règlements de l'Université, le texte suivant est un résumé du texte de thèse originale et de ses illustrations.

Le texte intégral de cette thèse est déposé à raison d'un exemplaire complet à l'Institut de Géologie de l'Université de Genève, un à la Bibliothèque Publique et Universitaire de Genève et un à la Bibliothèque Nationale de Berne.

Il comprend un texte dactylographié de 240 pages ainsi qu'une abondante documentation graphique de cartes, profils, coupes, diagrammes d'enregistrements et tableaux récapitulatifs. Des microfilms peuvent être demandés aux frais du requérant.

AVANT-PROPOS

La thèse que présente M^{me} C. Serruya a été élaborée, pour toute la partie matérielle et technique, au Centre de recherches géodynamiques à Thonon.

C'est là encore qu'ont été utilisés les importants crédits mis à la disposition de l'auteur par le Centre national de la recherche scientifique pour ses travaux.

Il me paraît superflu de présenter ici le Centre de recherches, avec ses nombreuses ressources de logements, locaux de laboratoires, d'enseignement et d'ateliers. Un bateau équipé d'appareils appropriés est amarré au port du domaine de Corzent.

Je dois par contre rappeler que ce Centre est l'œuvre du professeur Louis Glangaud dont il a réalisé les plans, le développement et le financement. Depuis sa fondation, de nombreux travaux d'hydrologie, de biologie, de limnologie, de clima-

* Adresse actuelle: Kinneret Limnological Laboratory, The National Council for Research and development, P.O.B. 345 Tiberias (Israël).

tologie, de sédimentologie et de géologie se sont élaborés à partir de cette Maison dont l'activité est essentiellement orientée sur le Lac Léman et son environnement.

C'est grâce aussi aux facilités matérielles mises à disposition des chercheurs par l'inlassable activité de M. Glangeaud que peuvent paraître des travaux comme celui qui suit. Il faut l'impulsion d'un chercheur actif lui-même pour susciter les travaux autour de lui et stimuler leur développement.

Les facilités d'ordre matériel ne suffisent pas sans un appui financier et là encore, M. le professeur L. Glangeaud a été à l'origine des crédits accordés par le C.N.R.S. pour les études sur le Lac.

Il m'a paru bon de préciser ce que fut le cadre dans lequel s'est déroulée l'étude des sédiments du Lac.

M^{me} C. Serruya apporte diverses précisions complémentaires dans sa préface. Ainsi le lecteur pourra voir la part de chacun et de chaque élément ayant contribué à l'élaboration de cette thèse.

Augustin LOMBARD.

PRÉFACE

C'est autour du lac de Genève qu'est née, à la fin du siècle dernier, la Limnologie. L'œuvre passionnante et si complète de FOREL conféra d'emblée à cette jeune science un caractère accompli. Ce fut, de plus, l'une des premières sciences de synthèse, où, pour l'étude d'un milieu, il fallait, à la fois et convenablement intégrées, les données de l'hydrologie, de la météorologie, de la chimie, de la biologie, de la sédimentologie...

En comparaison de cette œuvre de toute une vie et de celles des nombreux chercheurs qui ont suivi FOREL, mes quatre années de recherches sur le lac Léman sont peu de choses. Cependant, les nouvelles possibilités techniques de même que l'existence du Centre de recherches géodynamiques au bord du lac m'ont permis d'aborder l'étude du phénomène de sédimentation lacustre dans une perspective un peu différente de mes illustres prédécesseurs. Cela excluait le travail isolé dans un laboratoire spécialisé. Aussi, ai-je contracté des dettes de reconnaissance envers de nombreux laboratoires, équipes et chercheurs.

Tout d'abord, j'exprime ma vive reconnaissance aux deux professeurs grâce auxquels ce travail a pu être réalisé:

M. le professeur Aug. Lombard qui m'a si chaleureusement accueillie à son laboratoire de l'Institut des sciences de la terre de Genève et m'a si généreusement consacré son temps. Je n'oublierai pas l'amicale ambiance de ce laboratoire.

M. le professeur L. Glangeaud, fondateur et directeur du Centre de recherches géodynamiques de Thonon. Le professeur Glangeaud m'a permis de travailler au

Centre et d'en utiliser les nombreuses ressources en laboratoires, ateliers et bateau laboratoire. C'est aussi le professeur L. Glangeaud qui m'a procuré l'appui financier nécessaire à mes travaux. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude.

C'est un agréable devoir de remercier M. le directeur du Centre national de la recherche scientifique qui m'a accordé un crédit spécial pour effectuer ma première campagne de sondage sismique continu.

Je remercie également M. P. Vivier, directeur de la Station d'hydrobiologie continentale de Paris qui a permis à l'équipe travaillant sur le lac de Nantua d'effectuer pour moi analyses et prélèvements et à qui je dois d'avoir pu utiliser le matériel de l'Institut national de la recherche agronomique.

Le commandant J. Y. Cousteau a mis à notre disposition un important matériel océanographique. Je lui exprime ici ma profonde reconnaissance.

M. J. Brouardel, Directeur de recherches au C.N.R.S. m'a apporté une aide constante pour mes mesures de productivité primaire. Je suis heureuse de pouvoir lui témoigner ma gratitude.

J'adresse mes sentiments de profonde reconnaissance à MM. les professeurs S. C. Rittenberg et G. V. Chillingar de la California University qui m'ont dispensé de si loin leur temps et leur conseils.

Le professeur E. Tongiorgi, directeur du Laboratoire de Géologie nucléaire de Pise m'a reçue avec beaucoup de bienveillance à son laboratoire et a mis à ma disposition tout le matériel nécessaire aux mesures de thermoluminescence naturelle et induite. Je l'en remercie très vivement ainsi que M^{me} C. Grazzini, assistante.

Le stage que j'ai effectué au Centre d'études nucléaires de Grenoble pour la mesure des densités des sédiments par rayonnement a été organisé par M. Guizerix, chef de la Section d'application des radioéléments à qui j'adresse mes sincères remerciements.

M^{me} S. Duplaix, maître de Recherches au C.N.R.S., M^{me} J. Sauvage, chargée de Recherches au C.N.R.S., M. O. Leenhardt, ingénieur géophysicien à l'Institut océanographique de Monaco, M. A. Baudran, directeur technique à la Société française de céramique, M. G. Kulbicki, chef du Département de géochimie à la Société nationale des pétroles d'Aquitaine ont bien voulu me faire profiter de leurs connaissances et de leur expérience dans des domaines très variés: à tous ces chercheurs, j'exprime mon amicale reconnaissance.

Je n'oublie pas le personnel du Centre de recherches géodynamiques qui a contribué à la réalisation de ce travail et à qui j'adresse un amical merci. M. M. Gravelle, son sous-directeur et M^{me} A. M. Houlgard, régisseur, qui ont fait tout leur possible pour me procurer matériel et documentation. M. Orand, ingénieur M. et M^{me} Romanens, chimistes, M. Gagnaire, topographe, M^{me} Contamine, aide-technique, M^{me} Chiara, photographe, M. Bosson, électronicien et particulièrement M. Oliver, mécanicien, qui m'ont aidé avec beaucoup de gentillesse et de bonne volonté pour effectuer prélèvements, expériences sur le lac et analyses.

Il m'est très agréable de remercier bien vivement les membres du Laboratoire de géologie de l'Institut des sciences de la terre de Genève pour leur très amicale et efficace contribution en particulier M. Zbinden, dessinateur, qui s'est chargé de toute la partie graphique de ce travail.

J'exprime une reconnaissance toute particulière à mon mari, S. Serruya, limnologue, qui, en plus d'une aide matérielle déjà appréciable m'a prodigué des conseils indispensables et m'a fait bénéficier de l'expérience qu'il avait acquise sur le lac de Nantua. De plus ses encouragements et son soutien permanents ont été pour beaucoup dans l'accomplissement de mon travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève, à l'Institut des sciences de la terre de l'Université de Genève et à M. J. Pinto, Madrid, pour leur contribution à l'édition de ce travail.

INTRODUCTION

L'étude des sédiments actuels est un immense domaine qui n'a été exploré qu'assez récemment. La sédimentologie a commencé par être une branche de la géologie et, pendant cette phase, a donné lieu à de nombreuses études minéralogiques.

Plus tard, on a pris conscience que la vase est autre chose que du minéral et que sa seule étude descriptive est impuissante à rendre compte des transformations qui s'y produisent.

La vase est un complexe minéralo-organique très riche en eau. La matière organique y existe sous deux formes: matière organique morte et matière organique vivante constituée par les bactéries. Si la définition précédente suffit pour décrire un état de la vase à un moment donné, elle doit être complétée si l'on veut exprimer son évolution dynamique. De ce dernier point de vue, la vase est, tout comme les sols, le lieu où la matière vivante retourne vers le minéral; c'est le laboratoire où, à travers les étapes d'un catabolisme très complexe et mal connu, s'effectue toute une partie du cycle de la vie. Rien d'étonnant, par conséquent, que la faible proportion d'éléments organiques des vases « induisent » véritablement le devenir de celles-ci. Cela explique également la voie très féconde où se sont engagées plusieurs équipes américaines et soviétiques qui, sans perdre de vue le but géologique de leurs études, ont orienté leurs recherches vers les modalités de dégradation des matières organiques dans les différents milieux et les conséquences de celles-ci sur le sédiment qui en résulte.

Les noms de EMERY, RITTENBERG, VALLENTYNE, DEGENS, BRUJEWICZ, BOGOMOLOV, STARIKOVA, TAGEEVA... y sont liés. C'est également la voie qu'avait tracée en France le professeur BOURCART et celle qu'a suivie J. DEBYSER.

Tous ces travaux aboutirent à la création d'une nouvelle branche de la sédimentologie: la Biogéochimie dont une des applications est la recherche des conditions ayant pu favoriser la genèse des pétroles.

Cependant, un même sédiment n'évoluera pas de façon identique s'il se dépose dans un bassin appartenant à une aire tectoniquement stable ou à une aire encore active; les transformations diagénétiques seront influencées par la qualité des eaux, leur température et leur productivité organique, etc...

Par conséquent, aucune étude sédimentologique ne devrait être entreprise avant que soit connu un certain nombre de données sur le *bassin sédimentaire* et sur le *milieu de dépôt*.

Tenant compte de ces considérations, notre travail se divise comme suit:

Première partie : Description de la nature et de la résistance à l'érosion des principales roches du bassin d'alimentation. Etude quantitative des débits liquides et solides du Rhône valaisan.

Deuxième partie : Elle concerne l'étude du milieu lacustre:

milieu physique: transparence et température

milieu chimique

milieu biologique: une étude quantitative au Carbone 14 de la productivité primaire a été réalisée. On a ainsi déterminé expérimentalement la quantité de plancton autotrophe annuellement synthétisé dans le lac.

Troisième partie : La morphologie du socle molassique a été examinée à l'aide du sondage sismique continu. Les résultats obtenus permettent de préciser l'histoire géologique de la région lémanique et l'origine du lac, de déterminer l'épaisseur des moraines et des sédiments et de se faire une idée sur les tendances tectoniques des différentes parties de la zone lémanique qui expliquent certaines variations spatiales de la vitesse de sédimentation.

L'emploi du sondeur de vase et des carottages ont conduit à l'étude détaillée des sédiments postglaciaires.

Quatrième partie : Cette partie traite essentiellement des relations entre le faciès du sédiment et la nature du milieu de dépôt. Le mécanisme de formation des sulfures et le mode de dépôt des éléments traces sont spécialement envisagés.

Cinquième partie : Cette partie concerne l'étude physique des sédiments et est orientée vers l'étude du départ d'eau dans les premiers stades de la diagenèse. Nous montrons comment l'oxydation est inductrice du tassemement. L'éventualité du rôle de phénomènes électriques pendant la diagenèse est envisagée. Enfin, diverses techniques nouvelles d'étude des sédiments y sont exposées (mesure des densités par rayonnement...)

Sixième partie : Du point de vue thermodynamique, un lac est un système non fermé puisqu'il reçoit de l'énergie de l'extérieur (soleil).

Cet apport énergétique provoque un ensemble d'actions et de rétroactions irréversibles qui constituent l'évolution du bassin sédimentaire dans le temps.

Cette subordination des phénomènes limnologiques à l'apport énergétique nous a conduits à une classification des paramètres intervenant dans les lacs. Nous avons alors été conduits à la notion de bilan: à condition d'avoir des mesures fréquentes (et si possible continues) de l'énergie solaire, de la température de l'eau, de sa transparence..., et de pouvoir traiter ces informations à l'aide de calculateurs, on peut prévoir *quantitativement*:

- 1) ce qui se produira à l'interface vase-eau;
- 2) l'évolution générale d'un bassin sédimentaire.

PREMIÈRE PARTIE

LE BASSIN D'ALIMENTATION DU LÉMAN

CHAPITRE PREMIER

CARACTÉRISTIQUES DU BASSIN ET ORIGINE DES MATERIAUX DÉTRITIQUES

Le bassin d'alimentation du lac Léman est grossièrement orienté est-ouest. Il s'étend entre les latitudes extrêmes de 45° 52' Nord et 46° 41' Nord et les longitudes de 6° 3' Est et 8° 28' Est. C'est l'un des grands bassins drainant le versant nord des Alpes.

Sa superficie totale est de 7.975 km² si l'on considère comme exutoire du bassin la station de Genève-Port. Le lac Léman occupe 582 km² de ce bassin.

Les glaciers qui recouvrent les plus hauts sommets occupent une surface évaluée à 11,7% dans l'Atlas Siegfried d'après des levés effectués entre 1839 et 1901. La nouvelle carte nationale donne une valeur de 10,6% qui correspond aux levés effectués entre 1922 et 1949. Ces chiffres expriment clairement la décrue glaciaire si marquée depuis le début du siècle.

L'altitude du bassin varie entre +372 m, cote du plan d'eau du lac, et +4.634 m dans le Haut Valais (Mont-Rose). Pour l'ensemble du bassin l'altitude moyenne est de +1.670 m.

Du point de vue hydrologique et géologique, le bassin du Léman est dissymétrique et hétérogène:

l'extension beaucoup plus importante du versant sud par rapport au versant Nord entraîne une grande différence dans les apports en eau des deux rives; la plus grande partie de l'eau du Léman vient des affluents de rive gauche.

le bassin lémanique recoupe cinq domaines géologiques différents (fig. 1).

Par contre, il offre une remarquable homogénéité dans la composition minéralogique de ses différentes roches: qu'on analyse les alluvions des massifs cristallins, la molasse ou bien la moraine, on trouve toujours à peu près le même cortège « alpin » de minéraux: epidote, zircon, glaucophane, quartz, chlorite, illite. Dans les massifs en place, on a bien des roches aussi différentes que des granites, des micaschistes, des calcaires gréseux, des marnes, des « argiles » morainiques, mais toutes ces roches prennent un visage commun dans un même matériau détritique final.

Le Valais constitue les cinq huitièmes du bassin total du Léman: aussi est-il le principal pourvoyeur du lac en eau, en substances dissoutes et en matières charriées. Le versant nord du Valais est essentiellement formé des nappes helvétiques, encadrées par les massifs granitiques de l'Aar-St-Gothard à l'Est, du Mont-Blanc-Aiguilles-Rouges à l'Ouest. Le versant sud, par contre, appartient aux Pennides, prolongement de la zone briançonnaise. Entre ces deux domaines, le Rhône suit, jusqu'à Sion, une ligne tectonique majeure: le chevauchement pennique frontal qui sépare les Alpes externes de la zone interne.

Au point de vue pétrographique, les nappes helvétiques du versant nord sont à dominante calcaire. En raison des températures relativement basses qui règnent pendant une grande partie de l'année dans ces régions, la solubilité accrue du CO_2 augmente l'agressivité des eaux. Les eaux descendant du versant nord sont donc particulièrement riches en carbonate de calcium dissous.

Par contre les massifs cristallins et métamorphiques de la zone pennique sont peu sensibles à l'altération chimique, l'hydrolyse des feldspaths étant assez restreinte en climat froid. Sur ce versant sud, l'érosion mécanique est dominante; les alluvions qui en proviennent sont riches en micas, quartz, feldspaths, séricite et chlorite. La taille des éléments de la charge solide ira du sable aux grands galets et aux blocs.

Nous voyons alors s'esquisser les grands traits de la sédimentation dans le Léman: dans des eaux carbonatées calciques descend sans cesse une pluie de particules de quartz, chlorite, illite, mica... d'origine purement détritique.

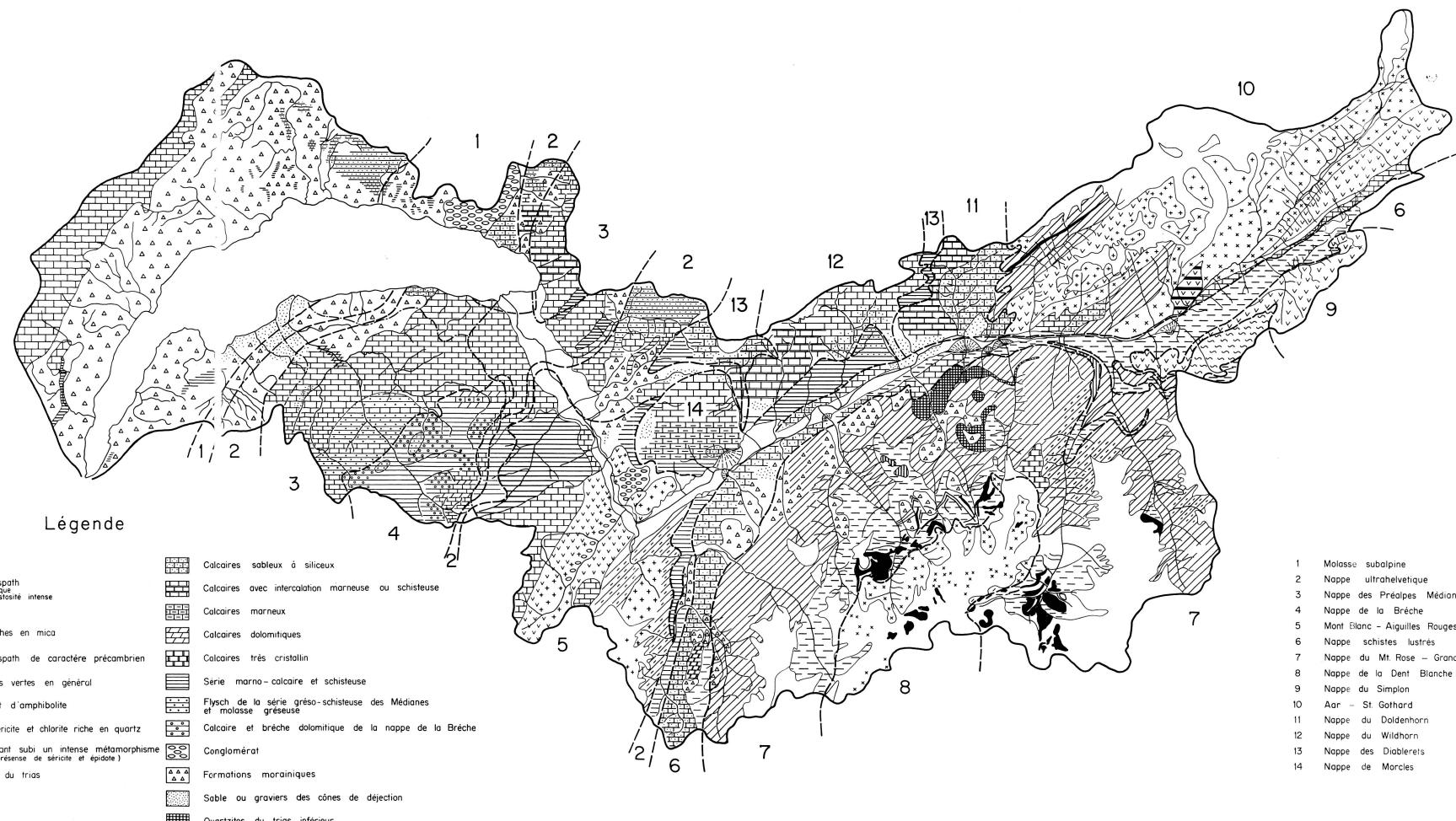
CHAPITRE II

DÉBITS LIQUIDES ET SOLIDES DES PRINCIPAUX AFFLUENTS DU LÉMAN

Le débit liquide parvenant au Léman est approximativement de $240 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne. Le Rhône valaisan fournit 75% de ces apports, la rive française 13% et la rive suisse 7%. (BLAVOUX, DUSSART, MANEGLIER et SALVETTI 1962).

Le lac a un régime glaciaire. L'étiage a lieu en décembre, janvier et février avec un débit minimum de $65 \text{ m}^3/\text{s}$. La crue a lieu en juin, juillet et août avec des pics supérieurs à $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces valeurs correspondent aux moyennes 1935-1964 de la station de la Porte-du-Scex.

L'Office fédéral de l'Economie hydraulique de Berne a commencé en octobre 1964 à mesurer régulièrement huit à neuf fois par mois, à la station de la Porte-du-Scex, la charge solide en suspension des eaux du Rhône valaisan. Les mesures qui m'ont aimablement été communiquées m'ont permis d'établir la valeur probable des masses solides charriées pendant l'année hydrologique 1964-1965.



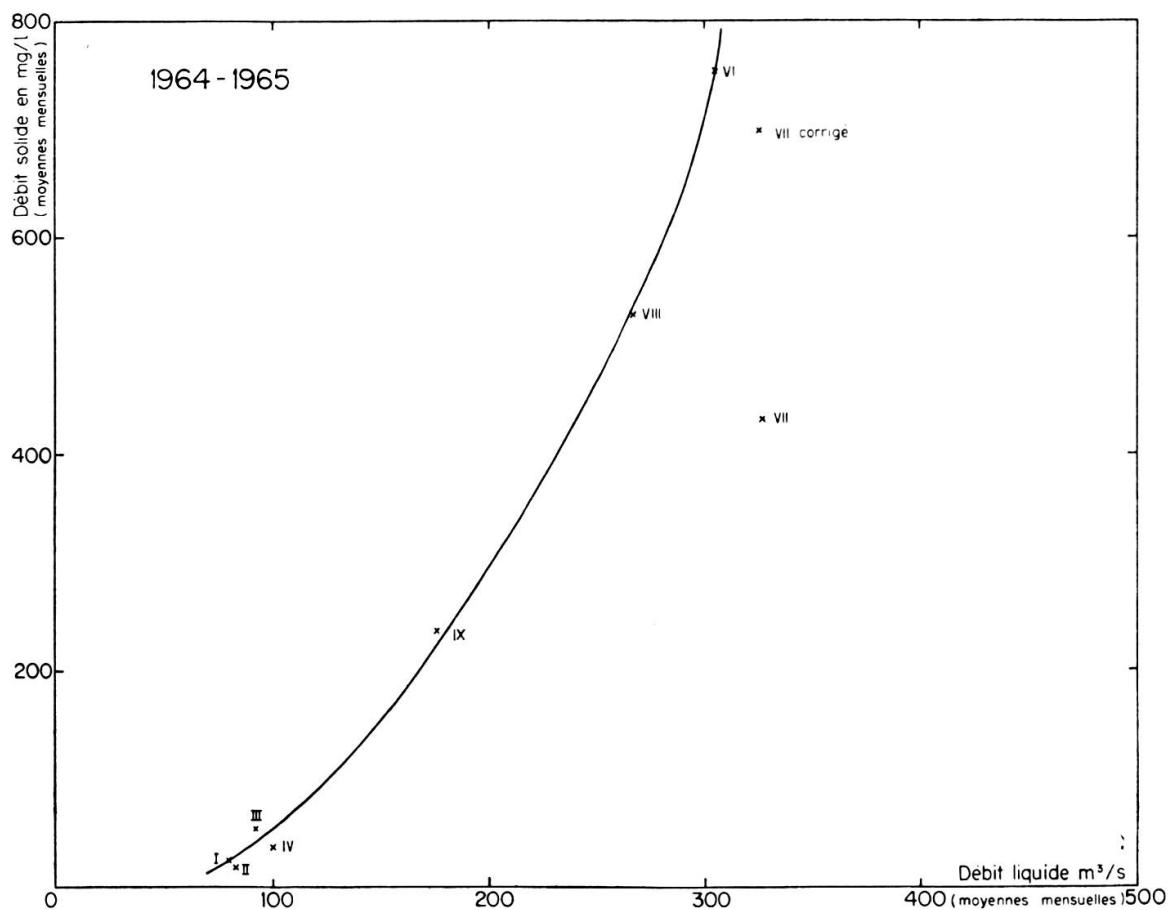


FIG. 2. — Corrélation entre la charge en suspension et les débits liquides du Rhône.
Les chiffres romains indiquent le mois auquel correspond la mesure.

	Kilos par seconde	Tonnes par mois
Octobre 1964	7,9	20.450
Novembre 1964	4,5	11.664
Décembre 1964	2,8	7.335
Janvier 1965	2,0	5.184
Février 1965	1,58	4.095
Mars 1965	5,04	13.064
Avril 1965	4,25	11.016
Mai 1965	12,50	32.400
Juin 1965	326,00	844.992
Juillet 1965	350,80	909.273
Août 1965	210,00	544.320
Septembre 1965	89,90	233.020

Pour toute l'année 1964-1965, le Rhône a charrié vers le lac plus de 2.600.000 Tonnes de matières en suspension soit une valeur moyenne de 85 kg/s. Etant donné les faibles hydraulicités de l'année considérée, cette valeur est minimum. Il existe en effet une corrélation entre la charge solide moyenne mensuelle et le débit mensuel du fleuve (fig. 2).

DEUXIÈME PARTIE

LE MILIEU LACUSTRE

Caractères généraux du lac

Le lac Léman s'étend entre les coordonnées suivantes:

46° 31' 03" lat. N — 6° 09' 06" long. E
46° 12' 27" lat. N — 6° 55' 56" long. E

Ses principales autres caractéristiques sont les suivantes:

Altitude du plan d'eau:	+372 m
Longueur:	72 km
Largeur maximum:	13,8 km de Morges à Amphion
Largeur moyenne:	8,1 km
Surface:	582,0 km ²
Profondeur maximum:	309,7 m
Profondeur moyenne:	152,7 m
Volume:	89000.10 ⁶ m ³

CHAPITRE PREMIER

LES CARACTÈRES PHYSIQUES

A. *Transparence et photométrie*

La transparence, mesurée au disque de Secchi, atteint 15 m en hiver et décroît vers 3 m en avril-mai. En juin et juillet, elle croît à nouveau vers 8 m pour diminuer une seconde fois en août-septembre vers 6 m.

Pendant toute l'année, la transparence est plus grande dans la zone pélagique que vers les rivages. De plus, la rive sud offre une transparence moyenne plus élevée que la rive nord; ceci est à mettre en relation avec une densité démographique plus basse. Les maxima de transparence sont obtenus dans la zone SE du lac, les minima dans les régions NE.

La valeur moyenne de la transparence a diminué de 2 m environ depuis 1900.

Pendant dix-huit mois, la transmission de la lumière dans les eaux lacustres a pu être suivie grâce à des cellules photoélectriques au sélénium immergables. Ce matériel de mesure est identique à celui qui a été décrit par BROUARDEL et RINCK (1963).

Les mesures effectuées sont des mesures relatives de luminosité et sont exprimées en pourcentages de l'éclairement superficiel grâce à un étalonnage préalable de la cellule. La valeur correspondant au 1% de l'éclairement de surface a été atteinte à 14,5 m en avril 1965, 13,5 m en mai 1965, 21 m en juin 1965, 25,5 m en juillet 1965, 19,5 m en août 1965, 33,5 m en janvier 1966, et 30 m en février 1966.

En février 1966, les mesures ont été effectuées avec un filtre vert puis un filtre bleu. A 30 m, l'éclairement relatif est de 0,51% avec la cellule nue, de 0,55% avec la cellule munie du filtre bleu, et 0,71% avec la cellule munie du filtre vert. De plus, les courbes montrent que l'absorption dans les couches supérieures est beaucoup plus importante en lumière naturelle qu'en lumière bleue ou verte: les fortes longueurs d'onde sont absorbées presqu'intégralement dans les couches superficielles et au-dessous seule la lumière bleu-verte se transmet.

B. *La température*

En surface, la température de l'eau varie dans de larges limites: 4° en janvier, 23° en juillet-août. En profondeur, la température varie rapidement dans les vingt

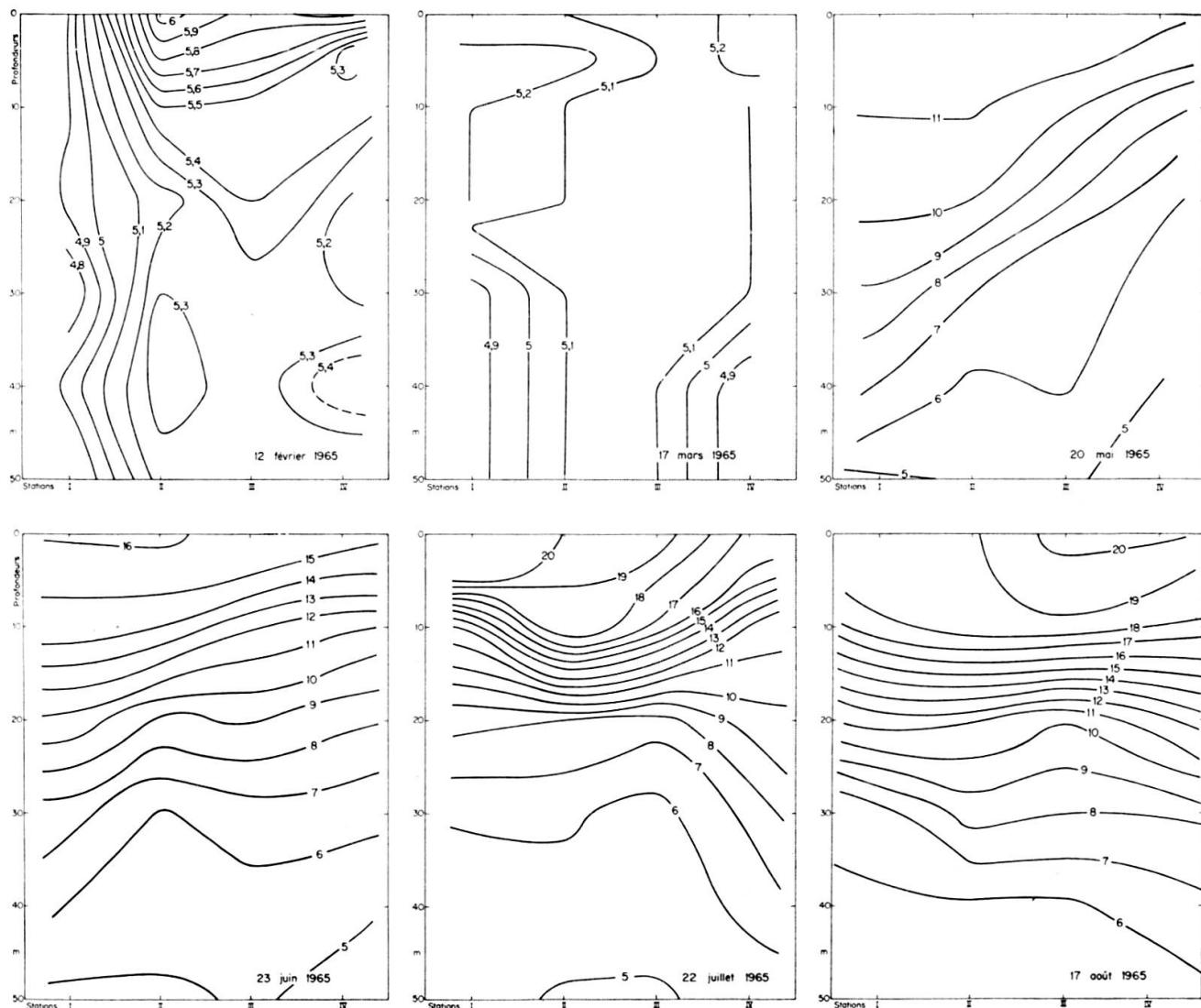


FIG. 3. — Courbes de température sur la transversale Thonon-Rolle pour l'année 1965.

premiers mètres. Au delà, les variations sont plus faibles et dans les grands fonds, la température est toute l'année voisine de 4,5°.

L'examen de l'évolution des plans isothermes dans l'espace et dans le temps pendant les années 1963-64-65 montre la présence d'une masse anormalement froide vers 20 m en juillet, puis entre 25 à 50 m en août-septembre, dans les stations de la côte française de la région de Thonon ayant de 50 à 150 m de fond. Cette anomalie est également observée dans la région d'Evian mais là, elle survient dès le mois de mai. Au contraire, la côte suisse, pendant ces mêmes périodes est le siège d'un courant relativement chaud. Il existe donc très fréquemment au cours de l'année un déséquilibre très marqué des plans isothermes (fig. 3).

Les échanges thermiques entre le lac et l'atmosphère varient avec les saisons : en février-mars, l'eau a de 2 à 4° de plus que l'air ; en septembre, l'eau arrive à avoir jusqu'à 9° de plus que l'air. En juin-juillet, ces écarts tendent vers zéro.

CHAPITRE II

LES CARACTÈRES CHIMIQUES

A. *Substances minérales*

Les eaux du Léman sont essentiellement carbonatées calciques. Elles sont très peu chargées puisque le résidu sec total est de 210 mg/1. Il est intéressant de noter que les eaux lacustres ont une salinité moyenne inférieure de 30 à 40 mg/1 à celles des eaux du Rhône valaisan.

A part une légère augmentation du calcium avec la profondeur, les eaux lacustres sont assez homogènes et comprennent : 43 à 49 mg/1 de Ca, 5 à 6 mg/1 de Mg, 2,1 à 2,4 mg/1 de Na, 1,5 mg/1 K, 90 à 110 mg CO³H, 0 à 10 mg/1 CO³, 47 à 53 mg/1 de SO₄, 2,5 mg/1 de Cl. Le Fer dissous est de l'ordre de 0,02 mg/1. La silice augmente régulièrement avec la profondeur passant de 0,14 mg/1 en surface à 3,05 mg/1 par 300 m de fond.

B. *Les gaz dissous*

La teneur de l'eau en gaz dissous est beaucoup plus variable que sa composition chimique fondamentale. L'étude des variations des gaz dissous est essentielle pour comprendre le dynamisme des premières transformations du sédiment.

1) *L'Oxygène dissous*

Les dosages ont été faits par la méthode de Winkler et l'oxygène dissous a été exprimé en mg/1 et en taux de saturation, c'est à dire le pourcentage entre la concen-

tration de l'eau en oxygène et sa concentration théorique maximum à la température considérée.

Les taux de saturation ont été portés sur des graphiques analogues à ceux des températures et dessinent des courbes d'égal pourcentage de saturation en fonction de la profondeur.

La transversale Thonon-Rolle * (stations CRG 1, 2, 3 et 4) a été étudiée en détails: nous représentons seulement les variations du taux de saturation de la station 2 de cette transversale pendant l'année 1965 (fig. 4).

CRG 1: Février présente le taux de saturation maximum pour l'année qu'on prendra comme référence. Voisin de 105%, il est constant sur toute la verticale. En mars, la désaturation commence. En mai, la sursaturation de surface dûe à l'activité photosynthétique du phyto-plancton autotrophe devient importante et s'étend jusqu'à 30 m de profondeur. Par contre, le fond (50 m) présente déjà une désaturation de 20% par rapport à février. Ces phénomènes s'accentuent en juin et en juillet où la sursaturation atteint son maximum: 131%. En août, un phénomène curieux se produit: à partir de 15 m la décroissance du taux de saturation est très rapide; mais celui-ci de 81,9% à 25 m croît à nouveau vers le fond. En août, un phénomène particulier, consommateur d'oxygène, se produit donc vers 25 m de fond.

CRG 2 et 3: Ces deux profils sont très semblables. Les sursaturations de surface en mai d'une part, en août d'autre part, sont très accusées. En août se produit le même phénomène qu'à CRG 1: il est situé ici à 20 m et le taux de saturation tombe à 83% puis il croît à nouveau et diminue vers le fond qui présente en juillet et août les valeurs minima pour l'année.

CRG 4: L'allure générale des courbes est la même. Cependant, les sursaturations superficielles sont moins accentuées. Il est aussi remarquable que les taux de saturation de la couche profonde sont plus élevés que celle de CRG 1 bien qu'à CRG 4 la bathymétrie soit plus grande. Pour comprendre cette dernière observation, il n'est pas inutile de regarder les profils thermiques de ces deux points pendant la même période. On constate que les températures, en mai et juin, sont inférieures de 2 à 4° à CRG 4. Il est donc probable que la rive suisse a, pendant cette période, reçu des eaux froides riches en oxygène.

Conclusions

Ce bref examen fait ressortir:

- 1° La plus grande teneur en oxygène des fonds de faible bathymétrie;
- 2° La sursaturation superficielle en oxygène correspondant aux maxima d'activité photosynthétique;

* Les stations mentionnées sont portées sur la carte de la figure 7.

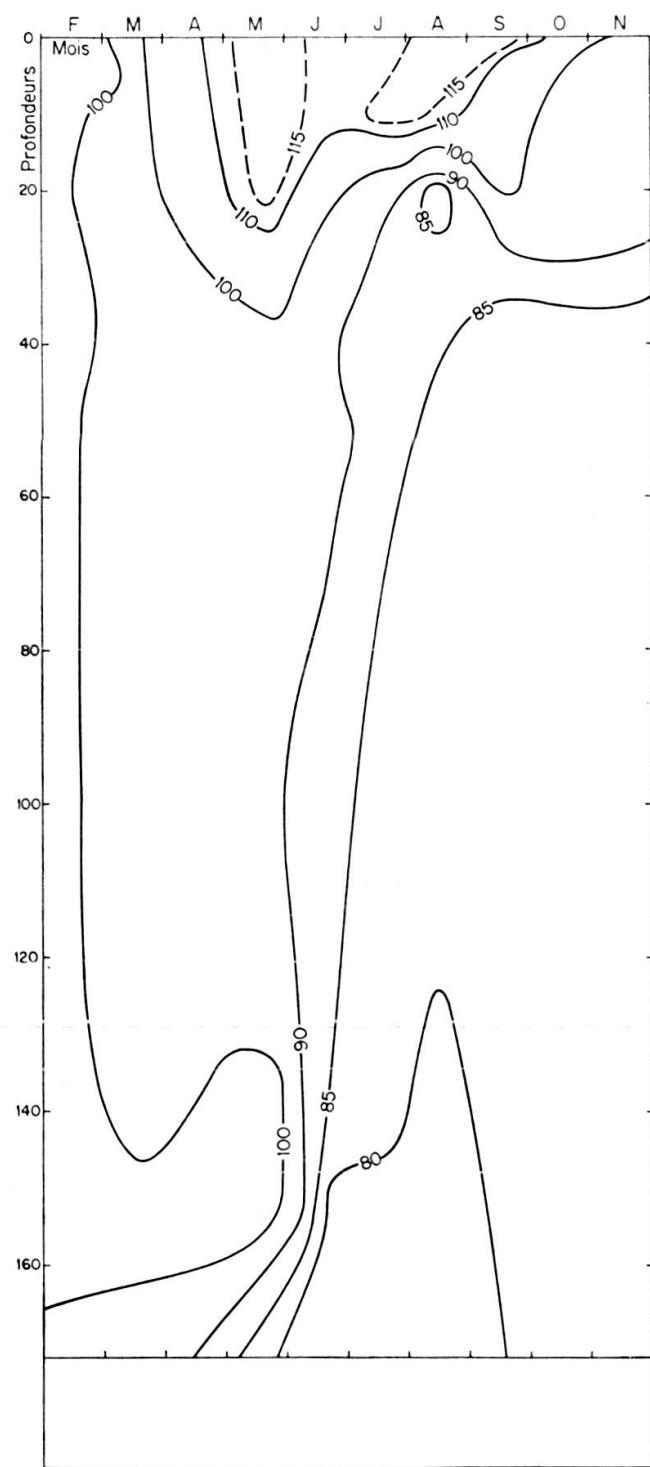


FIG. 4. — Courbes du taux de saturation en Oxygène. Station CRG 2 — Année 1965.
Les courbes sont exprimées en pourcentage du taux de saturation.

3^o Un phénomène consommateur d'oxygène se produisant en août entre 20 et 25 m. Celui-ci pourrait s'interpréter comme une zone d'oxydation importante du plancton mort provenant de la poussée d'été. Ceci semble être confirmé par la richesse de ce niveau en CO₂ et en bactéries comme nous le verrons plus loin ainsi que par la présence d'abondants nitrates et phosphates, etc.... Mais alors se pose une question: pourquoi ce déficit important n'apparaît-il qu'en août, puisque déjà en avril-mai a lieu une première poussée planctonique ? La stabilité des masses d'eau entre probablement en ligne de compte. En avril-mai les mouvements de l'eau sont encore importants et contribuent à faire pénétrer en profondeur les taux élevés de la surface. Au contraire, en août, les sursaturations restent très superficielles. La relative stabilité des masses d'eau est beaucoup plus favorable au développement de colonies bactériennes dégradant le plancton mort tombant des zones supérieures. Les produits de dégradation sont immédiatement recyclés dans de nouvelles synthèses. Ce phénomène est peut-être une des causes du second maximum annuel en septembre-octobre.

Il résulte de tout cela *l'ébauche d'un mécanisme possible de l'eutrophisation* dont les principales étapes seraient les suivantes:

augmentation de matières nutritives venant des rivages,
augmentation de la productivité primaire,
augmentation des particules en suspension dans l'eau,
diminution de la transparence, réchauffement d'une tranche d'eau plus mince,
assimilation réduite à des zones de plus en plus superficielles, grande stabilité
estivale des eaux,
naissance de zones de dégradation localisées sous la zone d'assimilation remettant
en circulation du CO₂, des nitrates phosphates, etc.,
recyclage des matières libérées.

On a alors affaire à un mécanisme auto-entretenu qui va accentuer peu à peu ses caractéristiques: transparence de plus en plus faible, zones inférieures ne se réchauffant pas en été et se désaturant de plus en plus en oxygène, etc. ...

Pour preuve de cette théorie, nous apporterons deux autres faits: dans les mesures anciennes d'oxygène et de température que nous avons exprimées en taux de saturation, on ne rencontre à aucun moment de l'année ce déficit en oxygène du thermocline, par exemple les mesures de P. Vivier en 1933, le lac de Nantua qui se trouve dans un état eutrophe très avancé, présente une zone identique très gravement déficitaire en été et durant tout l'automne: ainsi en 1965, à une station située en plein lac (40 m de prondeur) les études de S. Serruya donnent les valeurs suivantes:

Juillet 0 à 5 m 200% de saturation en oxygène

10 55%

15 76%

Août	0 à 5 m	120 à 170%
	10	22%
	15	45%
Septembre	0 à 5 m	120 à 150%
	10	26%
	15	40%

La décroissance du taux de saturation vers le fond est ensuite rapide et atteint 0% au niveau de celui-ci. De plus, les courbes isothermiques nous montrent un thermocline très superficiel situé à moins de 5 m de la surface.

Les limnologues ont depuis longtemps observé ces phénomènes dans certains lacs. E. A. BIRGE et C. JUDAY, 1911, mettent en relation ce minimum d'oxygène avec une accumulation de plancton mort. L. MINDER, 1922, et G. S. ANTONESCU, 1931, en rendent responsables la respiration du zooplancton. G. ALSTERBERG, 1927, croit y voir un manque de circulation des eaux. S. I. KUSNETZOV, 1939, 1952, explique ce déficit par la présence de nombreuses bactéries. E. A. THOMAS signale également ce phénomène dans le lac de Zurich (1955). Plus récemment, B. CZECHUGA (1959) dénonce toutes ces théories et nie en particulier le fait que ce déficit en oxygène est lié au thermocline. Il a montré que la consommation d'oxygène est maximum dans l'épilimnion mais qu'elle est compensée par la photosynthèse alors que dans le métalimnion cette compensation n'a plus lieu. Il donne l'exemple de lacs où le minimum d'oxygène n'est pas situé dans la zone thermoclinale.

Il semble, en accord, avec B. CZECHUGA qu'il est juste de considérer que la teneur en oxygène d'une tranche d'eau superficielle est un bilan entre les activités d'assimilation et les activités de dégradations. Il est également vrai que la zone déficiente en oxygène n'est pas absolument liée au thermocline puisque nous remarquons qu'à Nantua la zone déficiente en oxygène se situe vers 8-10 m alors que le thermocline est vers 5-6 m. La théorie de B. CZECHUGA nous paraît cependant en défaut lorsqu'elle réfute l'opinion de S. I. KUSNETZOV selon laquelle le déficit en oxygène est lié à une grande abondance de bactéries.

	Juin 1937	Septembre 1937	Septembre 1938	Juillet 1957
En surface	1020	652	1676	74
5 m	40	344	100	1100
10 m	88	36	188	1460
20 m	148	272	672	1580
30 m	92	48	272	290
40 m	16	60	32	440
50 m	—	276	184	300

Les études bactériologiques qui ont été faites sur le Léman sont en accord avec les opinions de S. I. KUSNETSOV.

E. NOVEL a donné en 1941 et en 1960 les résultats de comptages effectués sur des échantillons prélevés dans le Petit Lac.

Par contre, en 1958 et 1959, ce phénomène n'a pas été constaté aussi clairement.

Nous voyons que la zone de 20 m est caractérisée dans ces 3 prélèvements par une augmentation nette du nombre de bactéries.

En 1964, J. SHAPIRO trouva dans le lac Washington une corrélation très stricte entre ce minimum d'oxygène et des populations importantes de copépodes vivants.

La zone déficitaire en oxygène, se situant vers 20 m dans le Léman, (zone thermoclinale) vers 8 m à Nantua donc sous le thermocline, n'est pas seulement le résultat négatif d'une bilan photosynthèse-dégradation. Il semble qu'il y ait, du moins dans certains lacs, une activité bactérienne spéciale dans la zone pauvre en oxygène. La profondeur de cette zone déficitaire en oxygène est déterminée par la transparence qui est elle-même liée à l'intensité de la productivité primaire. Jusqu'ici les travaux sur cette question sont trop fragmentaires pour proposer une théorie générale qui ne pourra être élaborée que par la comparaison de nombreux lacs.

2) *Le gaz carbonique et son équilibre avec les carbonates et les bicarbonates (tableaux I)*

Méthodes de dosage:

Les prélèvements sont faits dans des flacons spécialement jaugés et conservés dans des boîtes calorifugées jusqu'au moment du dosage. Celui-ci se fait dans le flacon même. Si l'addition de phénolphtaléine provoque une coloration rose, on est en présence de carbonates et d'alcalis libres. On effectue une acidimétrie à l'acide sulfurique. Si on ne note aucune coloration rose, il y a présence de CO_2 libre qu'on titre par alcalimétrie. Pour le virage des bicarbonates on ajoute un indicateur mixte à base de rouge de méthyl et de vert de bromocrésol et on titre à l'acide sulfurique.

Bien que le dosage de CO_2 par cette méthode soit assez peu précis, des dosages simultanés par la méthode de Van Slikke, ont donné des résultats très comparables.

Les prélèvements relatifs aux dosages de CO_2 ont été faits en deux points situés au large de Thonon: A par 20 m de fond et B par 100 m de fond. Ces deux stations sont portées sur la fig. 7.

Les analyses portées sur le tableau n° 1 rendent compte des mesures effectuées en 1965 au point B. Nous voyons très clairement l'homogénéité de concentration en CO_2 et en bicarbonates pendant l'hiver (décembre 1965, janvier et février 1966) ainsi que la rapide disparition du CO_2 jusqu'à 20 m dès que la température se réchauffe. L'équilibre $\text{CO}_3^2-\text{H}-\text{CO}_3^2$ est alors déplacé d'où la présence de carbonates dans ces 20 premiers mètres. Le gaz carbonique augmente vers le fond, d'une part à cause de la baisse de température, d'autre part à cause des oxydations et fermentations de la vase. Presque toute l'année, la zone supérieure du lac jusqu'à 20 m apparaît

TABLEAU 1

Les teneurs en CO₂ au cours de l'année

Point B. Profondeur: 100 m

Unités = mg/l

Date	30 avril 1965			25 mai 1965			9 juin 1965			25 juin 1965			
	Profondeur	CO ₂	CO ₃	CO ₃ H	CO ₂	CO ₃	CO ₃ H	CO ₂	CO ₃	CO ₃ N	CO ₂	CO ₃	CO ₃ H
0 m	0	4,8	102,5	0	8,4	92,7		6,6	101,2	0	7,2	98,8	
5	0	4,8	100,0	0	6,0	99,4		6,0	102,5	0	—		
10	0	6,0	—	0	4,8	101,2		6,0	102,5	0	3,6	106,1	
15	0	3,6	104,9	0	5,7	100,6		5,4	103,7	0	—		
20	0		113,2	0	4,2	103,0		4,8	104,9	0	1,8	109,8	
25	0		113,2	0		112,0			—	0	0	112,2	
30	0		113,2	0		111,6	0,44		115,9	0,9	0	112,2	
40	0		114,7	0,88		111,6	1,32		113,4	1,8	0	112,2	
50	0		113,2	1,32		111,0	1,76		113,4	1,8	0	112,2	
75	0		114,7	2,42		112,0	2,64		104,9	1,8	0	113,5	
100	0		114,7			114,0			117,1	1,8	0	117,2	

entièrement dépourvue de CO₂ et la réserve de bicarbonates y est également très déficiente.

Des analyses semblables effectuées au point A montrent des phénomènes analogues, en particulier l'épuisement de l'eau en CO₂ libre pendant l'été à l'exception de la zone qui est en contact avec la vase.

L'étude des gaz dissous nous montre que la zone côtière du Léman occupe, du point de vue de la physiologie du sédiment, une position très particulière: par suite d'une transparence encore assez importante, la photosynthèse s'y produit presque jusqu'au contact de la vase, amenant à celle-ci une quantité d'oxygène non négligeable pour sa minéralisation.

TABLEAU 1 (*suite*)

Date	2 juillet 1965			16 juillet 1965			14 septembre 1965			7 octobre 1965		
Profondeur	CO ₂	CO ₃	CO ₃ H	CO ₂	CO ₃	CO ₃ H	CO ₂	CO ₃	CO ₃ H	CO ₂	CO ₃	CO ₃ H
0 m	0	4,8	104,9	0	9,0	93,9		4,2	95,2		10,2	84,2
5	0	—		0	—	—		—	—		—	—
10	0	4,2	106,1	0	5,4	102,5		3,0	100,8		8,4	89,1
15	0	—		0							—	—
20	0	1,2	111,0	0							3,0	104,9
25	0		112,2	0		112,2						
30	0,4		113,5	0,9		112,2	1,1		112,2	0,9		113,5
40			113,5	0,9		113,5	1,6		112,2	1,8		113,5
50	1,3		113,5	1,8		112,2	1,3		112,2	1,8		114,7
75	1,3		113,5	0,9		112,2	1,3			2,2		114,7
100	1,3		113,5	2,2		114,7	1,8			3,1		115,9

Date	8 décembre 1965			21 janvier 1966			16 février 1966			5 avril 1966		
Profondeur	CO ₂	CO ₃	CO ₃ H	CO ₂	CO ₃	CO ₃ H	CO ₂	CO ₃	CO ₃ H	CO ₂	CO ₃	CO ₃ H
0 m	0,9		107,8	2,2		112,2	0,9		113,5	0	6	101,3
5	1,3		106,4	1,9		114,7	0,9		113,5	0	4,8	104,9
10	1,3		106,1	1,8		113,5	0,9		113,5	0	0	114,7
20	1,3		105,6	1,8		108,6	0,9		113,5	0	0	113,5
30	1,8		106,4	1,6		113,5	0,9		113,5	0,9	0	113,5
40	1,8		105,4	1,9		114,7	0,9		113,5	0,9	0	114,7
50	1,8		102,5	1,8		114,7	—		—	1,8	0	113,5
75	1,8		105,9			—			—	1,8	0	114,7
100	1,8		105,4			—			—	2,6	0	114,7

CHAPITRE III

CARACTÈRES BIOLOGIQUES: LA PRODUCTIVITÉ PRIMAIRE

La matière organique joue un rôle considérable dans l'évolution du sédiment. Elle rend possible le développement de colonies bactériennes dont l'activité réagit sur l'orientation du sédiment vers un certain faciès.

Or, une grande partie de cette matière organique est représentée par le plancton autotrophe qui représente le maillon primordial dans la chaîne des prédateurs.

Il apparaît donc fondamental de pouvoir mesurer la quantité de phytoplancton qui est annuellement synthétisée c'est à dire la productivité primaire organique.

A. *Méthode de mesure :*

En 1952, STEEMAN NIELSEN mit au point une méthode de mesure directe de la productivité à l'aide de l'isotope radioactif du Carbone, le C¹⁴. On fournit au phytoplancton, pour ses synthèses glucidiques, du Carbone radioactif; le plancton qui en résulte est lui-même radioactif et son activité est proportionnelle à la quantité de matière organique synthétisée pendant le temps considéré.

Pratiquement, on expose, le long d'une ligne immergée, des flacons remplis d'eau prélevée aux différentes profondeurs d'exposition et injectés d'une certaine quantité d'une solution de bicarbonate de Na radioactif. La ligne reste exposée une demi-journée solaire; elle est ensuite relevée et l'eau des flacons est filtrée sur millipores. La radioactivité des filtres est alors déterminée et la quantité de matière organique synthétisée établie (BROUARDEL et RINCK 1963).

B. *Résultats :*

Les expériences de productivité que nous avons réalisées dans le Léman couvrent la période d'avril 1965 à septembre 1966. Les résultats que nous présentons ici concernent un cycle limnologique complet d'avril 1965 à avril 1966 et sont contenus dans le tableau n° II. Chaque niveau faisant l'objet de deux prélèvements les nombres donnés correspondent à la moyenne des deux mesures. Lorsqu'une case renferme deux nombres, le nombre inférieur représente l'absorption obscure obtenue par le comptage des filtres provenants des expériences faites à l'obscurité.

1^o *Productivité en fonction de la profondeur*

Ces résultats exprimés en mg/1/jour correspondent à la productivité nette apparente et sont représentés dans la figure 5a.

Ces graphiques nous permettent de faire un certain nombre d'observations:

TABLEAU II
La productivité primaire organique en fonction de la profondeur
 Station B, 100 m fond

	En 10^{-3} mg/l/jC								En mg/m ² /jC
	0 m	1 m	2,5 m	5 m	10 m	20 m	30 m	40 m	
<i>1965</i>									
6 avril . . .	36,3 0,5	14,5 2,4	114,6	98,4	21,3	6,2	5,0		1000
29 avril . . .	72,1 1,0	123 1,2	139		81,6	4,5	2,2		1470
25 mai . . .	83,5 1,8		130,8	77,8	13,1	0,8	0,4	0,3	800
3 juin . . .	26,2 0,6		45,8	36,1	179	1,1	0,3	0,3	400
25 juin . . .	9,3 5,6	41	72,1	43	20	5,8	0,8	0,3	530
16 juillet . . .	21,9 1,4	15,4	20	21,1	18,2	4,4	3,6	3,5	300
19 août . . .	56,7 1,4	108,6	93,6	83	22,9	1,5	0,5	0,5	730
14 septembre .	31,3 0,5		100	69,4	22,6	3,5	3,2	1,8	800
7 octobre . .	136,5 1,0		148,5	110,5	28	2,7	0,7	0,3	1130
15 décembre .	8,9 1,0	8,8	22,7	14,2	11,0	1,7	0,2	0,2	210
22 décembre .	14,8 0,2	15,3 0,3	21,3 0,2	23,9 0,2	10,2 0,2	2,4 0,2			250
<i>1966</i>									
21 janvier . .	7,4 0,1	6,8 0,2	7,2 0,2	7,7 0,2	4 0,2	1,1 0,2	0,3 2,1	0,1 0,1	75
16 février . . .	19,3 1,8	37,7 0,7	54,2 0,..	45,3	16,4 0,5	2,7 0,1	0,3 0,1	0,1 0,1	440
5 avril . . .	33,5 0,8	60,8 4,0	188,9 3,3	179,7	64,3 0,8	4,2	0,5	0,3 0,3	1600

Obscur: *Chiffre italique*

a) *La zone euphotique est dans le Léman restreinte aux 10 premiers mètres. Entre 10 et 20 m la décroissance de la productivité est très rapide. Au-delà de 20 m, elle est généralement négligeable.*

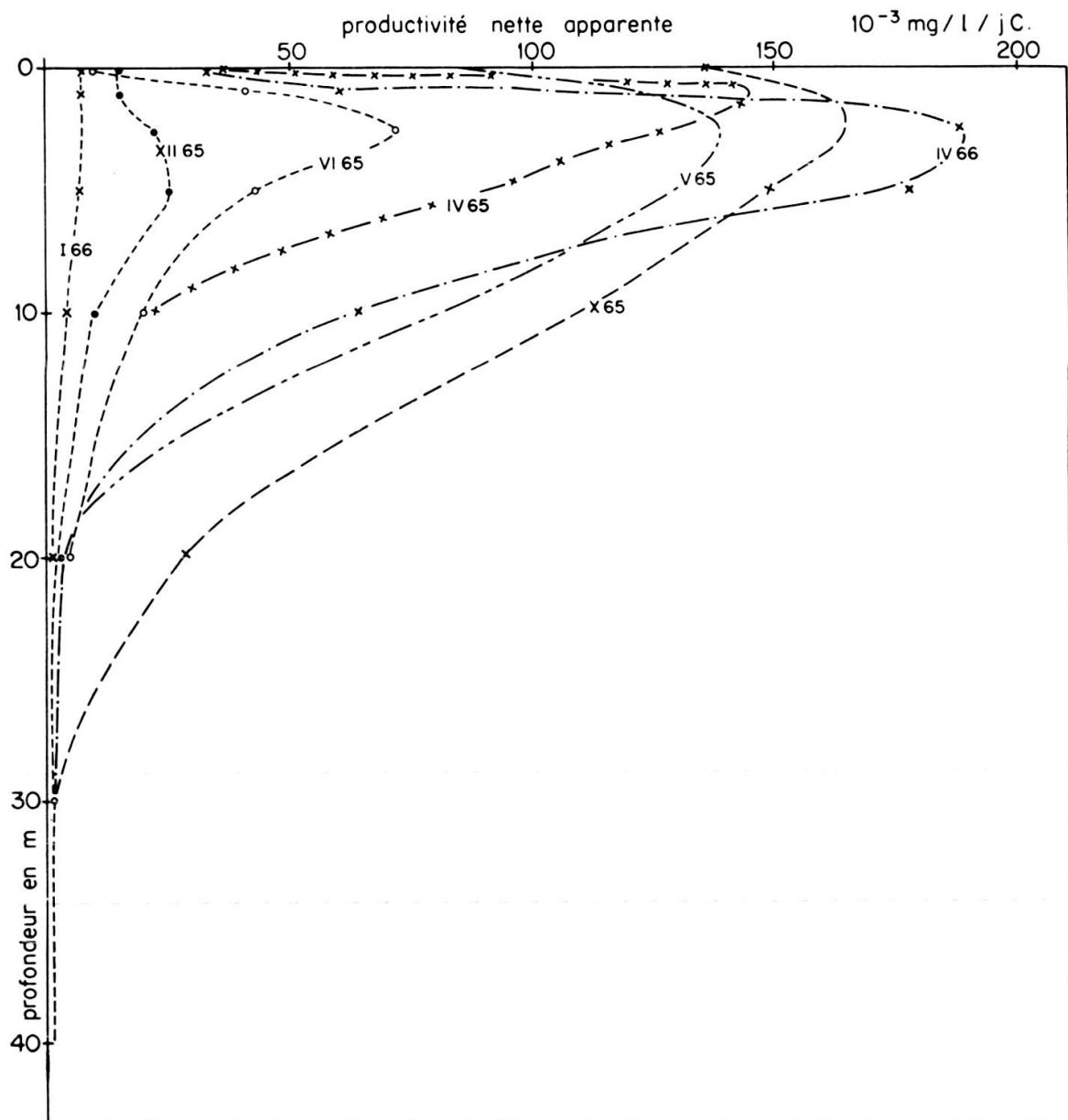


FIG. 5a. — Courbes de la productivité primaire en fonction de la profondeur.
Les nombres sur les courbes indiquent la date de l'expérience.

b) *Le maximum de synthèse chlorophyllienne n'a pas lieu en surface mais généralement vers 2,5 m.*

c) *Les valeurs absolues de la productivité sont élevées. La colonne figurant à droite du tableau représente la productivité nette apparente en $\text{mg}/\text{m}^2/\text{jour}$ obtenue par planimétrie des courbes précédentes. Pour avoir la productivité primaire brute,*

il faudrait augmenter encore ces valeurs de 10%, pour tenir compte de la respiration diurne et de l'assimilation plus lente de C^{14} par rapport au C^{12} .

Le maximum obtenu en avril 1966 est de $1600\text{mg/m}^2/\text{jour}$. Or en Méditerranée, le maximum mesuré pour la baie de Villefranche est de $331\text{mg/m}^2/\text{jour}$ (mai 1960) et pour la station de Cap Martin (avril 1960) de $161\text{mg/m}^2/\text{jour}$. On a donc des productivités qui sont cinq à dix fois plus fortes que celles de la mer Méditerranée.

2^o *Variations de la productivité au cours de l'année*

Le graphique de la figure n^o 5b établie à partir des valeurs de la productivité en $\text{mg/m}^2/\text{jour}$ montre l'évolution du phénomène au cours de l'année. Un trait nous

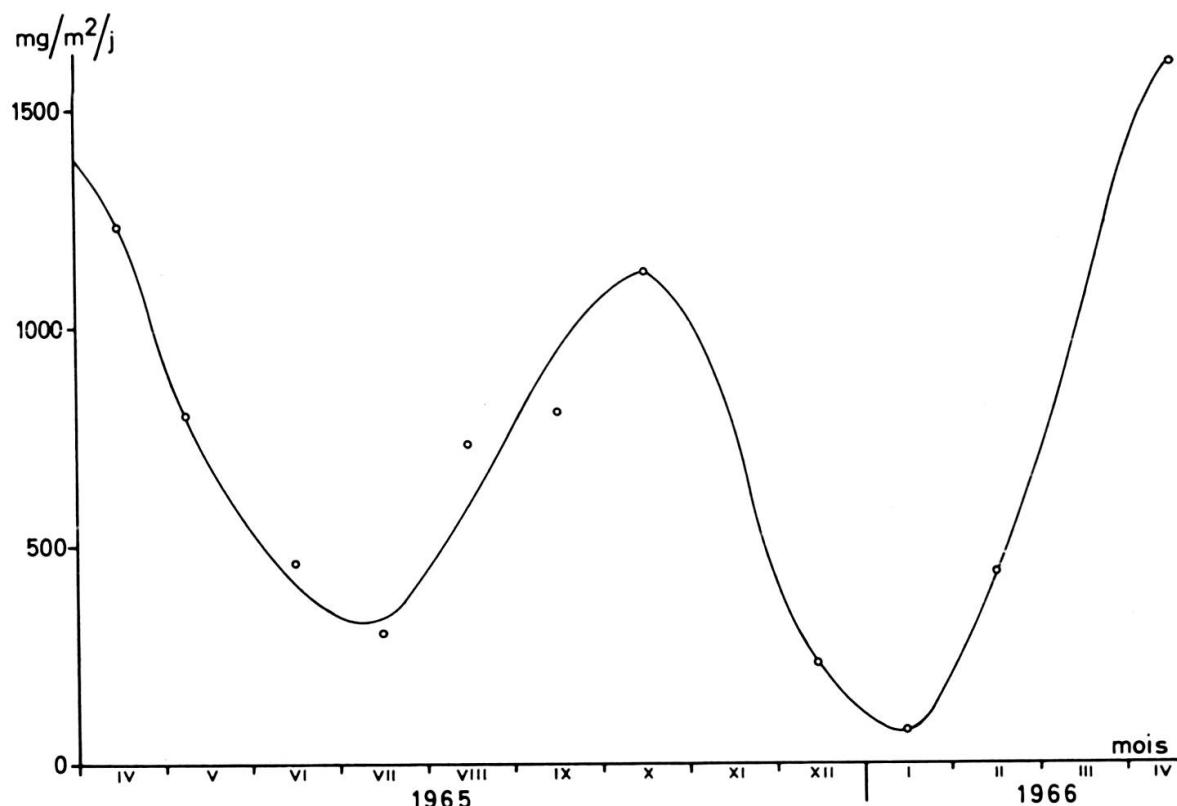


FIG. 5b. — Variations de la productivité primaire au cours de l'année.

frappe immédiatement: la courbe présente deux maxima dans l'année, l'un en avril, l'autre en octobre. Or, ceci n'est rigoureusement jamais le cas en mer. Nous avons déjà signalé l'existence actuelle de deux périodes de valeurs minima de la transparence alors que F. FOREL, en 1892, n'en signalait qu'un seul comme c'est aussi le cas en mer. Les courbes de productivité confirment que cette anomalie est bien due à deux « explosions » planctoniques.

Deux raisons peuvent être invoquées pour expliquer cette observation:

a) *Un changement a eu lieu dans les espèces planctoniques* peuplant le lac. L'augmentation croissante de la productivité depuis l'époque de FOREL a pu induire

une pareille modification. Les deux maxima correspondent aux périodes de reproduction de deux espèces différentes dont l'une serait dominante en avril, l'autre en octobre. Cette hypothèse ne rend cependant pas compte des très faibles valeurs de juin et juillet et des valeurs tout à fait moyennes de mai et d'août.

b) *En décembre et janvier* la productivité décroît à cause des basses températures et du faible éclairement. L'augmentation de ces facteurs à partir de mars est responsable du premier maximum. A partir de mai et jusqu'en septembre, deux phénomènes se produisent dans la masse d'eau du lac:

- la stratification thermique
- un débit important du Rhône

Or, c'est aussi exactement la période de faible productivité estivale.

La stratification a pour effet de couper l'épilimnion euphotique des zones profondes où s'effectue la minéralisation des vases et où s'accumulent le CO₂, les nitrates, les phosphates et les éléments traces, absolument nécessaires au plancton comme le Molybdène (C. R. GOLDMAN 1960, 1964). Le milieu de synthèse s'appauvrit donc continuellement. Le minimum estival a lieu à la période d'optimum thermique et d'éclairement maximum. Il est dû, contrairement au minimum hivernal, à l'apparition de facteurs limitants d'ordre chimique.

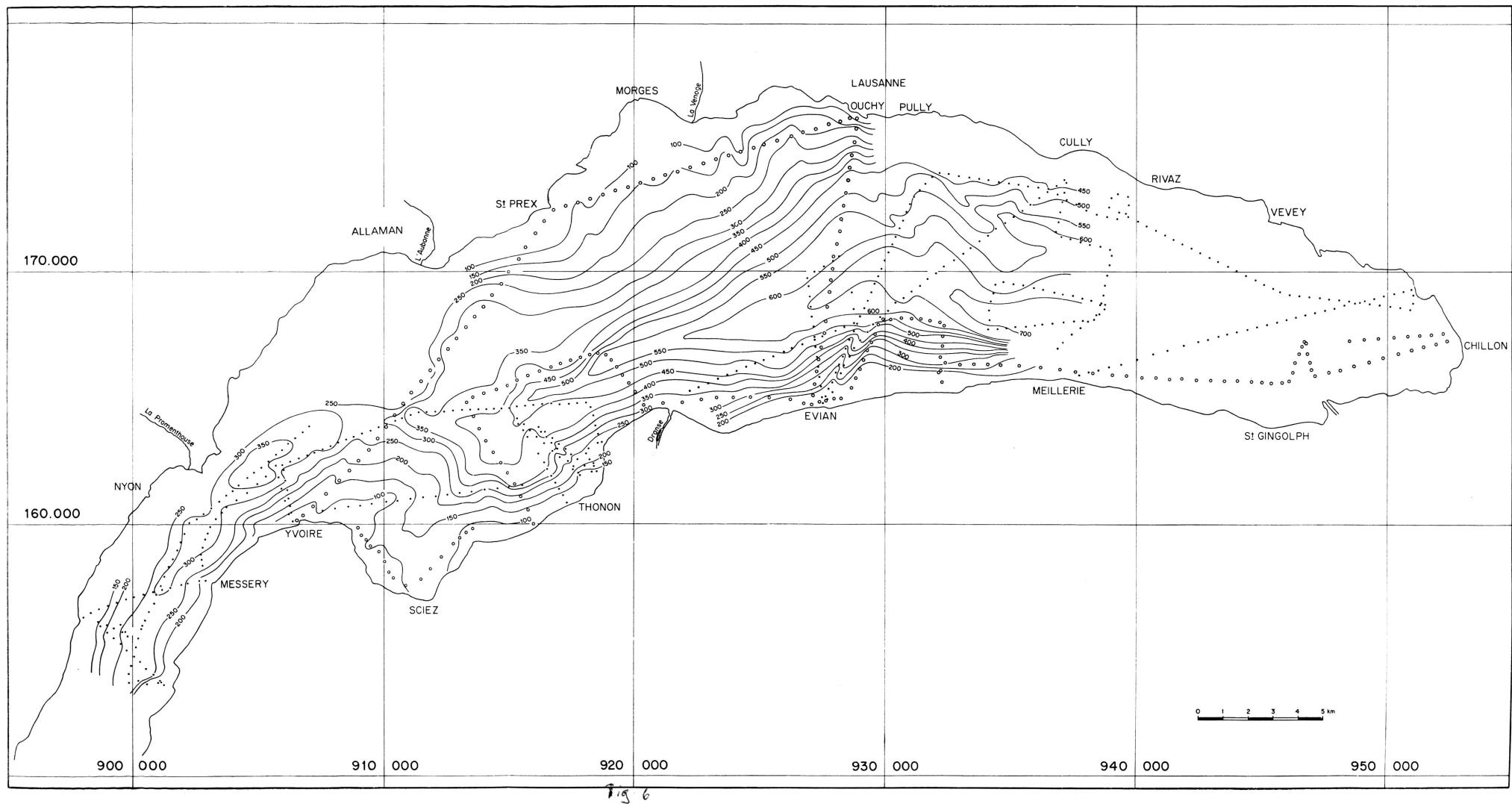
L'augmentation simultanée des eaux du Rhône, moins riches en éléments nutritifs que les eaux du fond du lac, accentue cet appauvrissement. I. FINDENEGG (1965) a signalé un phénomène analogue dans le lac de Constance où, à l'époque des hautes eaux du Rhin Alpin, le bassin du lac où se jette le Rhin a une productivité beaucoup plus faible que celui qui en est le plus éloigné.

Au mois de Septembre-Octobre la température de surface diminue et le thermocline devient labile. Une faible bise réussit à remuer toute la masse d'eau et à amener en surface les éléments nutritifs accumulés au fond. C'est ainsi que le maximum automnal de productivité correspond aux premiers « turn-over ».

Ce phénomène représente un signe très grave d'eutrophication; il prouve:

- que la stratification est plus longue et beaucoup plus efficace qu'au temps de FOREL,
- que la productivité a notablement augmenté puisque les synthèses autotrophes arrivent à épuiser totalement le milieu par ailleurs bien plus riche en matières nutritives qu'au début du siècle.

Mais le minimum estival signifie aussi l'existence de phénomènes d'auto-limitation qui ont pour résultat la décroissance des synthèses par épuisement du milieu. La solution aux phénomènes de pollution organique consisterait peut-être à accentuer de telles réactions ou à les provoquer.



3^o *Production globale pour l'ensemble du lac Léman (Année 1965/1966)*

La planimétrie de la courbe de la figure 5b donne une surface de 157 cm² pour 12 mois. Pour l'échelle choisie, 1 cm² représente :

$$100 \text{ mg/m}^2/\text{j} \times 15 \text{ j} = 1500 \text{ mg/m}^2/15 \text{ j}$$

La productivité annuelle est donc de :

$$1500 \text{ mg/m}^2/15 \text{ j} \times 157 = 236 \text{ g/m}^2/\text{an}$$

En moyenne, chaque colonne d'eau lacustre de 1 m² de section produit annuellement 236 g. A titre de comparaison la Baie de Villefranche très polluée a une productivité annuelle de 58 g/m².

La surface du lac est de 582 km², la productivité annuelle totale du Léman est donc en gros de : 137.350 tonnes. Cette valeur est à majorer de 10% pour tenir compte de l'absorption obscure de la respiration et des différences entre l'assimilation du ¹⁴C et du ¹²C. On obtient la valeur globale de 151.000 T/an.

En tenant compte d'une correction de 40% correspondant à la consommation globale de carbone par respiration, la quantité de carbone réellement mise à la disposition des prédateurs est de 90.000 tonnes environ par an pour l'ensemble du Lac.

4^o *Comparaison avec les productivités observées par d'autres auteurs dans les lacs*

En France, à notre connaissance, aucune mesure annuelle directe de la productivité dans les lacs n'a encore été faite. Il nous faut donc comparer nos résultats avec les données qui ont été obtenues sur les lacs américains et canadiens, les lacs de montagne en Autriche et les lacs suédois et danois.

Les courbes de productivité ont à peu près la même allure et les taux de productivité maximum se situent, comme les nôtres, un peu au-dessous de la surface de l'eau (W. RODHE 1958, E. STEEMAN NIELSEN 1959).

La profondeur à laquelle la productivité devient négligeable est très différente suivant les lacs et dépend de la transparence de leur eau.

Bien que peu d'auteurs aient suivi régulièrement pendant au moins une année les variations de la productivité, il semble que les deux maxima de printemps et d'automne, que nous observons dans le Léman, aient déjà été observés dans les lacs (C. R. GOLDMAN et R. G. WETZEL 1963).

La gamme de variations de la productivité, en valeur absolue, semble se situer entre 80 et 1130 mg/m²/jour. (G. NYGAARD 1955). Nos mesures se situent entre ces valeurs extrêmes.

I. FINDENNEG (1965) a mesuré, en juin et en septembre, la productivité des deux bassins du lac de Constance. Ses résultats indiquent, dans les premiers mètres, des productivités nettement plus élevées que les nôtres mais négligeables au-delà de 20 mètres. Considérées globalement, les surfaces de ses courbes sont voisines des nôtres.

TROISIÈME PARTIE

LE SOCLE MOLASSIQUE ET LA COUVERTURE SÉDIMENTAIRE

Dans ses grandes lignes structurales, le bassin du Léman occupe la partie basse d'un vaste synclinorium situé entre les Alpes, les Préalpes et le Jura.

Ce synclinorium est essentiellement formé de molasse plissée et faillée puis chevauchée par la partie frontale des Préalpes.

Il est impossible, et d'ailleurs superflu, d'énumérer les nombreux traits structuraux du socle rocheux du Léman. Seuls comptent les éléments majeurs. Ce sont, de l'amont à l'aval:

Le Haut-Lac, à l'amont d'une ligne: Meillerie-Montreux dans les Préalpes Médianes avec une fenêtre d'Ultrahelvétique au Bouveret, et de molasse autochtone.

Le Grand-Lac et le Petit-Lac entre la région ci-dessus et Genève: le fond et les rives reposent sur du Quaternaire et le socle molassique. Ce socle se divise à son tour en molasse subalpine charriée et molasse autochtone.

Toute la périphérie du lac montre que la molasse est plissée en anticlinaux et en synclinaux, divisés à leur tour en compartiments basculés entre failles et parcourus par d'autres failles majeures longitudinales ou transversales.

A titre d'exemple, on peut citer:

les plis du Petit-Lac, ceux de Morges, les isoclises du Grand-Lac et du Jorat,
les failles de la Côte et du Mormont,
les chevauchements de la Veveyse, de la molasse subalpine sur l'autochtone de Boisy et d'autres moins importantes

C'est dans ce cadre que vont s'inscrire les études géophysiques de détail qui suivent.

CHAPITRE PREMIER

TECHNOLOGIE

Lorsque nous avons entrepris l'étude du lac Léman, le caractère indispensable d'une étude géophysique s'est très vite imposé. Trois possibilités s'offraient à nous:

1^o Les explosifs ou les canons à gaz

Avec des pénétrations supérieures à 1.000 m ce matériel aurait permis de préciser les structures profondes. Les résultats auraient alors été corrélables avec les données

des sondages pétroliers réalisés autour du lac. Des questions d'ordre financier d'une part, de protection de la faune piscicole d'autre part, se sont opposées à l'emploi de ces méthodes.

2^o Les appareils de type sparker ou boomer

Contrairement à la méthode précédente, il s'agit d'une technique de sondage sismique continu (S.S.C.) en ce sens que l'on voit se dérouler sur l'enregistreur une coupe déjà restituée et continue des profils navigués. La profondeur d'investigation de ces appareils est plus faible mais ils ne causent aucun dommage aux êtres vivants. Des descriptions techniques en ont été faites par O. LEENHARDT (1964, 1965).

Leur utilisation a permis une reconnaissance détaillée de la topographie molassique préquaternaire ainsi que la localisation des moraines sous-lacustres.

Le travail a été réalisé au cours de 2 campagnes: l'une avec le concours de la C.G.G. (Compagnie Générale de Géophysique), la seconde en collaboration avec O. LEENHARDT, ingénieur géophysicien à l'Institut Océanographique de Monaco, grâce au matériel gracieusement prêté par ce dernier organisme. En tout 270 km de profils furent explorés.

3^o L'emploi du sondeur de vase

Cet appareil de faible puissance ne pénètre pas plus de 10 à 15 m de sédiments fins mais sa résolution est de l'ordre de 10 à 15 cm. Les résultats qu'il fournit sont donc comparables aux données obtenues par carottages. Il est facile de prévoir que bientôt aucune campagne de carottage ne se fera sans l'utilisation simultanée du sondeur de vase. En effet, le carottage est le type de l'observation ponctuelle pouvant ne refléter qu'une particularité liée au point de prélèvement et d'intérêt limité. L'emploi simultané des deux techniques permet:

d'établir la continuité des formations entre deux carottes une fois cet étalonnage réalisé.

En ce qui concerne le carottage, deux types d'appareils ont été utilisés: carottier Züllig à piston et à mouton actionné à la main fournissant des carottes de 35 mm de diamètre et de 5,5 m de longueur maximum. carottier Küllenberg permettant de prendre des carottes de 55 mm de diamètre et allant jusqu'à 10 m de longueur.

Trente et une carottes Züllig et vingt huit carottes Küllenberg représentant en tout une longueur de 200 m ont été prélevées.

Nous voyons, d'après les techniques utilisées, que deux types d'information ont pu être obtenus:

des informations dues au sparker et au boomer sur la structure profonde du lac, la disposition et l'épaisseur des moraines et des sédiments

des informations dues au sondeur de vase et au carottage sur la stratigraphie fine des sédiments postglaciaires.

Cela justifie la coupure en deux chapitres distincts de la présentation des résultats qui va suivre.

CHAPITRE II

RÉSULTATS DU SONDAGE SISMIQUE CONTINU

Les résultats obtenus par ces méthodes ont fait l'objet d'une publication détaillée (SERRUYA, LEENHARDT, LOMBARD 1967). Aussi n'en donnerons-nous qu'un bref résumé.

A. Les Principaux Réflecteurs

Quatre réflecteurs principaux ont été reconnus:

1. Horizon M: C'est l'horizon le plus profond qui ait été détecté. Il correspond à la molasse et affleure sous l'eau à Ouchy et à Yvoire où il a été étalonné.
2. Horizon C: dans la grande plaine centrale, la molasse est recouverte d'un horizon de nature inconnue, d'une épaisseur de 100 millisecondes (ms). Il se termine en biseau sur les talus du bassin et n'a pu être étalonné.
3. Horizon G: il se présente en placages sur les flancs du lac. Il ne présente aucune stratification mais de nombreuses diffractions.
4. Remplissage sédimentaire S et réflecteurs intrasédimentaires.

La dépression moiassique a été comblée par des sédiments. Le sondage sismique continu montre leur grande épaisseur et leur très nette planéité. Dans cette masse, on distingue des réflecteurs profonds peu nets et incurvés vers les bords et des réflecteurs plus superficiels nombreux et bien marqués.

B. Caractéristiques des Horizons M, G et S

1) Horizon M : (fig. 6)

Dans le Petit-Lac, la molasse dessine une dépression dont le flanc oriental est plus abrupt que le flanc occidental. Au centre de la cuvette, la pente générale de la molasse s'approfondit du Sud vers le Nord; le toit de la molasse se trouve à 200 ms sous la surface de l'eau au large d'Hermance et à 350 ms au NW d'Yvoire.

Dans le Grand-Lac, on constate que le toit de la molasse a la forme d'une « vallée » prenant naissance dans la baie de Sciez et se dirigeant vers l'Est (vallée prélémanique). De plus, tous les profils de la région orientale du Grand Lac montrent

l'enfoncement considérable de la molasse dans cette région: sa profondeur maximale est atteinte au large de Meillerie où elle se situe à 700 millisecondes par rapport au niveau moyen des eaux (environ — 180 m sous le niveau de la mer). Plus à l'Est, elle disparaît sous un recouvrement opaque correspondant probablement aux matériaux détritiques apportés par le Rhône.

Dans la région d'Yvoire et selon une direction Yvoire-Allaman, un axe anticlinal dans la molasse a été reconnu. Cette structure est déprimée en son centre par un col situé à 300 ms: elle constitue la véritable limite entre les deux lacs. Par ailleurs, la molasse forme, le long d'une ligne Evian-Pully, un bombement important qui a dévié vers le Nord la vallée prélemanique.

2) *Horizon G*

Cet horizon ne forme pas un revêtement continu mais remplit les dépressions du soubassement molassique. Ce placage est beaucoup plus épais sur la rive sud du Grand-lac, où il atteint 200 m, que sur sa rive Nord où il ne dépasse pas 20 m. Dans le Petit-Lac, au centre de la cuvette, les formations morainiques atteignent également près de 200 m. La présence des moraines dans le centre du Grand-Lac est hypothétique: tout dépend de la nature de l'horizon C.

3) *Horizon S*

Les sédiments récents sont peu abondants près des rivages: dans la région Thonon-Corzent et jusqu'à 20 m de fond, les sédiments tardi-glaciaires affleurent. Dans l'axe de la cuvette, l'épaisseur des sédiments croît d'Ouest en Est: 20 à 40 m dans le Petit-Lac, 50 m dans l'Ouest du Grand-Lac, 100 m au large d'Evian, plus de 200 m au large de Meillerie.

C. *Interprétation*

1^o Le Grand-Lac n'est pas dû au creusement glaciaire mais doit son origine à l'existence d'une grande vallée creusée par l'érosion fluviale. La vallée prélemanique représentait l'axe de drainage principal de l'arc préalpin.

2^o Le Petit-Lac n'est pas un affluent de l'Arve: la pente de la molasse est en effet inverse de ce qu'elle devrait être pour justifier cette hypothèse. C'est seulement un synclinal molassique, creusé en plusieurs endroits de dépressions fermées.

3^o Un certain nombre de caractères morphologiques peuvent être expliqués à la lumière des observations géophysiques:
le promontoire d'Yvoire est lié à la structure anticlinale reconnue dans cette région.
la forme déprimée de la baie de Sciez représente le cours moyen ou supérieur de la vallée prélemanique.

4^o La dorsale Pully-Evian correspond au prolongement sous-lacustre de la limite entre la molasse subalpine et la molasse autochtone.

5^o La cote très basse de la molasse dans le Haut-Lac ne peut s'expliquer qu'en admettant une subsidence importante de cette formation sous l'influence de la poussée exercée par le massif allochtone des Préalpes.

La vallée prélemanique peut-elle être reliée au réseau hydrographique existant aujourd'hui ? A quelle époque a-t-elle été creusée ? Ces deux questions ne peuvent recevoir de réponses catégoriques mais seulement faire l'objet d'hypothèses : Une ancienne Arve aurait coulé vers le Nord par la zone déprimée de Saint-Cergue, Machilly, Perrignier et Bonnaitrait, puis, continuant à suivre l'arc préalpin aurait creusé la dépression de Planbois et la vallée prélemanique. Lors de la formation du lac, cette pré-Arve aurait déposé d'épaisses assises sableuses sous la forme d'un delta local situé sous la baie d'Excenevex. Plus tard, au cours des invasions glaciaires les glaciers reprendront ce matériel qui sera à l'origine plus ou moins directe des dunes célèbres.

La période où se sont déroulés ces évènements est difficile à établir. Il est cependant logique de penser que le creusement de cette vallée circumalpine est très ancien : fin de l'Oligocène, début du Miocène, époque probable de mise en place des Préalpes. La vallée prélemanique allait sans doute alors rejoindre un ancien Rhône se dirigeant vers la mer du Nord par la dépression de Châtel-Saint-Denis. L'axe anticlinal d'Yvoire était la ligne de séparation entre le bassin de la mer du Nord et celui de la Méditerranée. La subsidence de la zone orientale amena la formation d'un lac, alors restreint à la zone orientale. Peut-être l'émissaire de ce lac a-t-il coulé un certain temps vers l'Est. Mais les mouvements tardifs, contemporains de la phase paroxysmale du Jura et de la surrection des massifs cristallins externes, soulevèrent la zone Jorat-Pélerin. Il arriva que l'anticlinal d'Yvoire se trouva topographiquement plus bas que l'exutoire oriental : le drainage s'établit alors vers l'Ouest. La dépression synclinale du Petit Lac a été submergée beaucoup plus tard lors du retrait des glaciers : si nous admettons qu'une ancienne Arve s'écoulait par la baie de Sciez, lors de la débâcle glaciaire, le cours inférieur de celle-ci fut encombré de moraines. L'Arve, en se frayant un passage vers l'Ouest, construisit un barrage efficace qui entraîna la mise en eau de la zone amont.

CHAPITRE III

RÉSULTATS COMPARÉS DU SONDEUR DE VASE
ET DES CAROTTAGES:
LA STRATIGRAPHIE DES SÉDIMENTS POSTGLACIAIRESA. *Les différents faciès superficiels rencontrés dans le lac par le sondeur de vase*

Du point de vue acoustique, six faciès principaux ont été rencontrés dans le lac Léman.

1^o *Faciès A*

Le faciès A est un sédiment finement rubané: il apparaît sur l'enregistrement sous forme de couches parallèles alternativement claires et foncées qui correspondent à des variations périodiques de densité. Cette vase rubanée peut reposer ou non sur un réflecteur puissant (moraine ou molasse).

Ce faciès a une grande extension dans le lac: il occupe la partie profonde du Grand-Lac et le centre du Petit-Lac. Mais alors que, dans le Petit-Lac, l'enregistrement en est parfait, il devient plus flou dans le Grand-Lac par suite de la grande épaisseur d'eau que les ondes élastiques de faible énergie du sondeur de vase ont à traverser.

2^o *Faciès B*

Le faciès B est un sédiment rubané très semblable au précédent mais il s'en distingue par des renforcements périodiques verticaux de la teinte sur l'enregistrement qui annonce des variations de densité. Ce faciès est très caractéristique du Haut-Lac. La couche B, épaisse d'une dizaine de mètres, repose sur un réflecteur puissant qui pourrait fort bien être du sable. Les variations de densité viennent-elles de tassements différentiels du sable ?

3^o *Faciès C*: vases à structures « en pagodes »

Le faciès C est un sédiment rubané dans lequel apparaissent, par renforcement de la teinte, des figures en forme de festons évoquant un toit de pagode. Celles-ci n'interrompent pas forcément la stratification. Elles peuvent atteindre une amplitude de 12 m de hauteur et se répètent tous les 20 m environ.

Dans certaines régions (Ouchy-Saint-Prex par exemple) il arrive que les pagodes affectent la totalité de la couche de vases rubanées. Dans d'autres régions au contraire, par exemple au large d'Evian, il existe une couche à structures en pagodes et, reposant sur celle-ci, une couche de type A à litage normal.

L'analyse minutieuse de la répartition de ces figures montre qu'elles n'apparaissent qu'entre 30 et 160 m de profondeur. On ne les trouve jamais sur des pentes inférieures à 3 % même si les conditions bathymétriques que nous venons d'indiquer sont réalisées. Enfin, il est nécessaire qu'il y ait au moins 3 m de vase pour qu'elles apparaissent.

La répartition spatiale de ce faciès est la suivante: Entre Yvoire et le delta de la Drance, il forme une bande de 2 km de large environ, et repose sur la moraine. On en retrouve une bande étroite le long de la côte à Evian. Les vases qui bordent les côtes du Petit-Lac sont aussi affectées par les « pagodes ». Là encore la moraine est l'horizon sous-jacent.

Dans la baie de Morges-Lausanne, ce faciès occupe une largeur de 2 à 4 km mais là, il repose presque toujours sur la molasse, exceptionnellement sur des moraines ayant rempli les dépressions du relief molassique.

En définitive, les structures en pagodes semblent apparaître dans des vases peu épaisses reposant sur un fond dur représentant une déclivité minimum de 3 %. Signalons enfin que dans quelques cas ces pagodes sont apparues sur les enregistrements boomer.

Après échanges de vue avec E. D. MACKEE (U.S.A.) et S. DZULINSKY (Pologne), nous sommes tentés d'interpréter ces structures comme des tassements différentiels, le long d'une pente, dûs à un début de décollement (creep movement). La surface principale sur laquelle s'effectue celui-ci serait le sommet du Dryas, de densité 1,9 environ. Les sédiments qui recouvrent le Dryas ayant une densité plus faible ont la faculté de glisser en se contractant alors que le Dryas compact reste stable. Une des conséquences pratiques de ces observations est la nécessité, sur les bords du Léman, d'ancrer tous les ouvrages dans le Dryas, seule formation solide et sûre.

4^o *Faciès D*

Les sables et les galets qui forment ce faciès sont assez denses pour absorber toute l'énergie et on n'observe aucune pénétration. C'est le cas du cône de la Drance et du delta du Rhône.

5^o *Faciès E*

De même que le faciès précédent, la moraine ne se laisse pas pénétrer et de plus sa surface est très irrégulière.

6^o *Faciès F*

Les placages deltaïques se présentent près de l'embouchure de quelques rivières (Redon, Promenthouse); leur topographie montre un plateau doucement incliné entre 6 et 8 m, puis une brusque rupture de pente amène le talus jusqu'à 15 m de profondeur où il rejoint la pente normale du fond. Sous ce plateau, aucune réflexion

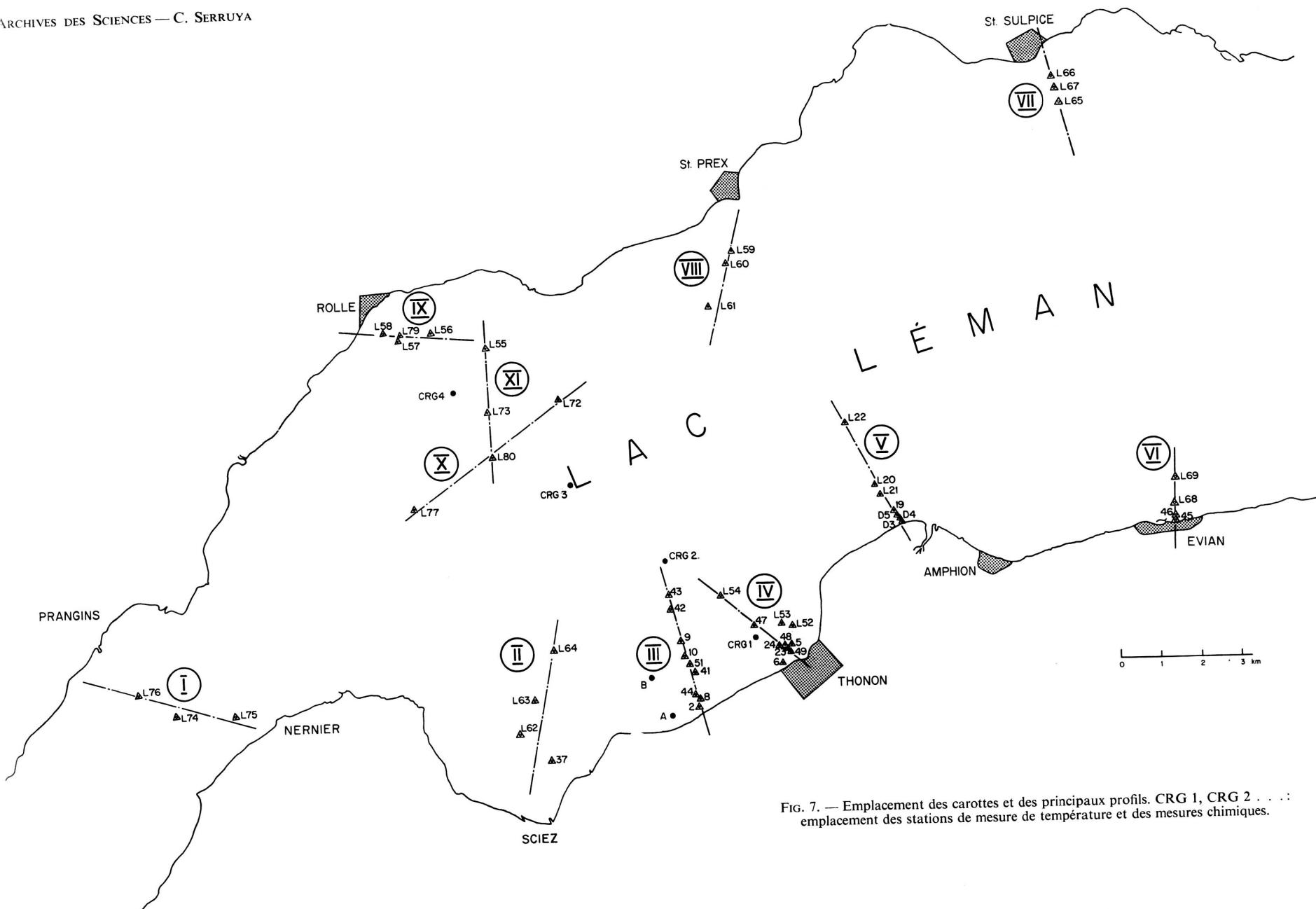


FIG. 7. — Emplacement des carottes et des principaux profils. CRG 1, CRG 2 . . . :
emplacement des stations de mesure de température et des mesures chimiques.

n'est enregistrée: en effet, le sable que nous y avons dragué forme écran. Ceci explique que dans certains cas (Promenthouse) des réflecteurs continus en amont et en aval de la rupture de pente sont masqués par les sables.

B. *Les profils de carottages*

La position des 59 carottes que nous allons étudier est portée sur la carte de la figure n° 7. Les figures n° 8 à 17 inclus représentent les dix profils sur lesquels se situent les carottages. Ces profils donnent une idée de la stratigraphie des sédiments quaternaires post-glaciaires ainsi que de l'épaisseur des différents étages.

Une question qui a particulièrement retenu notre attention a été la synthèse des données du sondeur de vase, des carottages et des résultats palynologiques. Autrement dit: étant donné un réflecteur obtenu par le sondeur de vase, à quelle formation sédimentaire se rapporte-t-il et quel est son âge ? C'est une question que se sont posés de nombreux auteurs: J. L. WORZEL le premier en 1959 mit en évidence la correspondance entre certaines réflections d'échosondage et la présence de couches de cendre volcanique, démontrant ainsi la réalité des micro-stratifications enregistrées par les sondeurs de vase. Puis W. B. F. RYAN, F. WORKUM Jr et J. B. HERSEY (1965) montrèrent d'une façon plus générale que les réflections étaient dues à des variations de la teneur en eau ou de la taille des grains.

De notre côté, nous avons pu, dans plusieurs cas favorables, faire une corrélation très précise entre des réflecteurs du sondeur de vase et certains niveaux des carottes.

La description que nous allons présenter des profils de carottages comprendra donc, outre les résultats sédimentologiques, les corrélations qui ont pu être établies de façon tout à fait sûre avec les résultats du sondeur de vase. Mais auparavant, nous décrirons brièvement les différents types de sédiments que nous avons rencontrés dans les carottes.

1° *Les différents types de sédiments dans les carottes*

Type S₁: vase gris-bleu clair sans traces noires, de densité 1,2 à 1,4; leur teneur en eau est toujours supérieure à 100% et atteint souvent 150%.

Type S₁ bis: vase gris-bleu clair à faible teneur en eau.

Type S₂: vase gris-bleu clair, parsemée de granules de monosulfures de fer noirs ou de striations noires peu marquées.

Type S₃: vase gris-foncé très riche en laminae noires dont l'épaisseur est inférieure ou égale au millimètre. Ces laminae peuvent se répéter à intervalles réguliers ou bien être séries en groupes séparés par un sédiment de type S₁.

Dans d'autres cas des paquets de laminae peu marquées sont interrompues tous les 10 cm environ par une couche noire plus épaisse. Entre deux laminae noires, le sédiment peut prendre toutes les teintes intermédiaires entre le noir et le blanc. On peut souvent identifier à la loupe 2, 3 ou 4 microstrates plus claires

entre 2 laminae noires, soit par exemple la succession suivante (L 52 — 300 cm):
 lamina noire 1 mm — lamina blanche 1 mm — microstrate 5 mm —
 lamina noire 1 mm.

Il arrive aussi qu'on ait la succession: lamina blanche-couche grise-lamina blanche-couche grise, sans intercalation de lamina noire (L 52 — 303 cm).

Ce type de sédiment doit être observé aussitôt l'ouverture de la carotte: quelques heures après, les laminae noires ont disparu laissant à leur place une trainée de couleur rouille.

Dans un chapitre ultérieur nous examinerons en détail le mode de formation de ces microstrates et leur signification. Nous dirons seulement ici qu'il s'agit de varves d'oxydo-réduction et que les laminae noires sont riches en monosulfures de fer.

Les types S_1 S_2 S_3 sont formés de particules très fines: 98% de celles-ci sont inférieures à 40 microns.

Type S_4 : Il s'agit d'un sédiment beige strié de laminae jaune clair, épaisses de 1 à 5 mm. Ce sédiment est plus grossier que les types précédents; la fraction grossière, supérieure à 40 microns peut atteindre 20%. Cependant la taille des éléments de la fraction grossière reste peu importante ceux-ci se rapprochent plus des sablons que des sables. Ce type ne renferme aucune trace noire.

Leur densité est élevée: 1,7 à 1,9.

Type S_5 : Ce sédiment est également de couleur très claire, beige ou gris. La matrice est toujours une vase fine plastique mais elle renferme des sables grossiers et même des graviers et des galets qui peuvent atteindre 2 à 3 cm. C'est une formation de densité égale ou supérieure à 1,9 difficile à prélever au carottier en raison des galets.

Type S_6 : Dans la zone de l'embouchure du Rhône, les sédiments offrent un faciès particulier reflétant les variations saisonnières du débit solide du fleuve. E. PAREJAS (1929) a fort bien décrit les varves du Haut Lac, c'est-à-dire cette alternance de matériaux fins et de matériaux grossiers. Quelques carottes ont été prises dans le Haut-Lac et nous avons pu constater ce phénomène mais ces carottes n'ont pas fait l'objet d'une étude systématique comme celles du Grand-Lac.

Remarque sur les différents types de varves rencontrées

Nous tenons à signaler ici la nature et le mode de formation différents des dépôts saisonniers du Haut-Lac et du Grand-Lac. Les varves de PAREJAS reflètent directement les variations de la puissance de transport du Rhône qui se traduisent par des variations granulométriques importantes. Au contraire dans le Grand-Lac, nous sommes en dehors des zones d'apport et les varves résultent alors de l'activité biochimique et des conditions d'oxydo-réduction qui règnent dans la zone de dépôt. Elles provien-

ment donc en dernière analyse de l'état plus ou moins eutrophe du milieu celui-ci étant une résultante d'innombrables facteurs tels que la température, la richesse en éléments nutritifs, la forme du bassin, les courants, etc...

Dans le lac Léman on a donc, d'Est en Ouest, un sédiment à varves granulométriques passant à un sédiment à varves biochimiques que nous avons appelées *varves d'oxydo-réduction*. Par conséquent, dans une carotte du Haut-Lac, nous pouvons étudier les variations d'apport du Rhône et indirectement les variations au cours du temps de la température qui régit la fonte des glaciers.

Dans le Grand-Lac, l'étude d'une carotte nous renseignera sur les variations de l'activité biologique, sur l'évolution des conditions chimiques et particulièrement de l'équilibre rédox au cours du temps. Ces conditions étant, comme nous le verrons, très liées à la température, les varves d'oxydo-réduction nous donnent un moyen de vérifier les données déduites des varves granulométriques. A des varves granulométriques épaisses dans le Haut-Lac doivent correspondre des varves d'oxydo-réduction à couches très tranchées et à microstrates d'été très noires. En fait, la question est beaucoup plus compliquée car nous verrons qu'il y a une convergence entre les effets dûs au climat et les effets dûs à la bathymétrie à laquelle se dépose le sédiment. Il faut donc pour donner une interprétation correcte d'un sédiment connaître :

sa distance par rapport aux zones d'alimentation
le climat auquel est soumis le bassin
la bathymétrie du dépôt

2^o *Les profils : description stratigraphique*

57 des 59 carottages se distribuent sur 11 profils. Les deux autres carottes ont été prélevées en dehors des profils pour vérifier des points particuliers.

Sur ces profils ont été portés :

la coupe lithologique du sondage
la coupe palynologique lorsqu'elle a pu être déterminée
le profil de teneur en eau
le profil du pouvoir réducteur: cette dernière grandeur est mesurée par la méthode d'Ann. C'est en gros la diminution du pouvoir oxydant du bichromate de potassium après qu'il ait oxydé le sédiment considéré.

Profil n^o 1. Fig. 8, Petit-Lac.

Le sondeur de vase avait mis en évidence sur le trajet Nernier-Prangins une structure insolite: un réflecteur, se traduisant par une ligne blanche sur l'enregistrement, venait à affleurer dans la partie médiane du profil; de chaque côté en se dirigeant vers les rives, ce réflecteur était recouvert par des sédiments plus récents. Au point de vue acoustique, ces sédiments étaient bien pénétrés et présentaient un fin rubanage. Par contre, la formation située sous le réflecteur « blanc » était opaque.

80	Numéro d'ordre des carottes
PR	Pouvoir réducteur
TE	Teneur en eau
I + 1.80	Mesure de densité du sédiment frais
	Vase grise homogène
	Varves à laminae noires et grises - vase fine
	Niveau sableux
	Varves à laminae jaunes et beiges - vase sableuse
	Niveau graveleux
	Coquilles
	Morceau de bois
	Granules de sulfure de fer

Echelle palynologique

○	Actuel	xx	Dryas
	Subatlantique Subboréal		Alleröd
ss	Atlantique	xx	Oldest Dryas
	Boréal		
vvv	Préboréal		

FIG. 8 — Légende des profils de carottage.

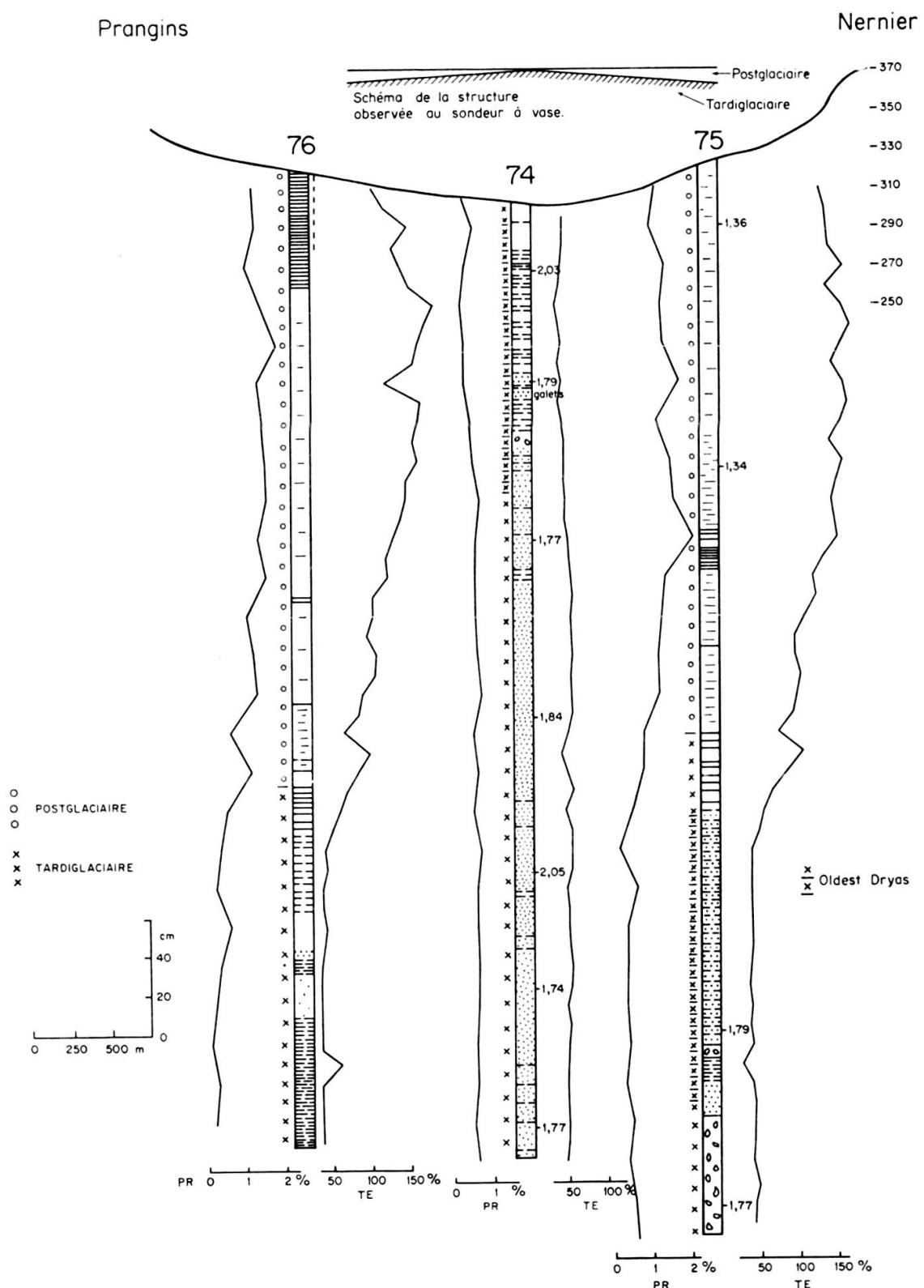


FIG. 8bis. — Profil de carottage n° I.

Les carottages ont eu pour but d'identifier la nature de ce réflecteur et de voir si on pouvait retrouver, par sondage direct, la structure observée au sondeur. La carotte L 74 a été implantée dans la partie centrale du profil, par 84 m de fond, la carotte L 76 à 1 km à l'Ouest-Nord-Ouest de la précédente par 55 m de fond et la carotte L 75 à 1500 m à l'Est-Sud-Est de la L 74 par 60 m de fond. Le profil de la figure 8 montre que la concordance entre les résultats du carottage et ceux du sondeur de vase est parfaite.

CAROTTE L 74. — Analyse sédimentologique :

0-97 cm: Type S₅ à varves jaunes et sablons; sa teneur en eau est inférieure à 50% et son pouvoir réducteur inférieur à 0,5%. Sa densité est supérieure à 2.

Au niveau 97 cm une couche de galets a été traversée: deux galets ont pénétré dans le carottier; l'un formé de schiste, l'autre de calcaire noir veiné de blanc.

110-490 » A partir du niveau 110 cm, les varves jaunes se raréfient et jusqu'à la fin de la carotte (490 cm) on reste dans une formation sablo-argileuse, de densité élevée: 1,7 à 2,05. Par endroits, le sable forme des noyaux durs séparés par des lits argileux jaunâtres de 2 à 3 mm d'épaisseur mais cette alternance n'a plus du tout la régularité qu'elle présente entre les niveaux 0 et 100 cm.

Dans la partie terminale du sondage, les quelques couches jaunes argileuses rencontrées sont très fines.

Analyse palynologique :

0-10 cm: Older Dryas à Hippophae dominants.

10-150 » Bölling à Pins dominants.

150-490 » Oldest Dryas à Artémisia dominant suivie de Graminées et de quelques pins. Dans ce dernier niveau la fréquence pollinique est très faible.

Notons que ce niveau appartenant indiscutablement à une période froide contient quelques spécimens d'Abies. Leur très mauvais état de conservation et la présence d'un Pinus haploxyton laissent à penser qu'il s'agit de remaniements.

CAROTTE L 75. — Analyse sédimentologique :

0-185 cm: Vase assez homogène, grise, présentant des petits points noirs disséminés.

185-216 » Les points noirs se resserrent et finissent par former des micro-couches.

216-250 » Nouvelle passée de vase grise parsemée de points noirs.

250-330 » Niveau à varves noires-grises comparables au niveau 185-208.

330-455 cm: A 330 cm on entre dans la formation par laquelle débute la L 74 caractérisée par cette alternance de limon sablonneux beige clair et de couches jaune vif.

455-560 » La granulométrie devient franchement grossière avec des galets pouvant atteindre 2 à 3 cm.

Analyse palynologique :

- 0-8 cm: Subatlantique à *Quercus*, *Juglans* et *Picea*. L'*Abies* est peu abondant.
- 30-200 » Subboréal à *Abies*, *Quercus* et *Corylus*.
- 200-230 » Atlantique à *Quercus*, *Abies* et *Tilia*.
- 230-280 » Préboréal à *Pinus* et *Betula*.
- 330-340 » Alleröd à *Pinus*, *Betula* et *Hippophae*.
- 340-350 » Older Dryas à *Hippophae* et *Pinus*.
- 350-490 » Bölling à *Pinus*, *Betula* et *Hippophae*.
- 490-560 » Oldest Dryas à *Artémisia*, pin secondaire.

Le Younger Dryas n'a pas été déterminé mais il peut être compris entre les niveaux 280 et 330 où il n'y a pas eu d'échantillonnage.

CAROTTE L 76. — Analyse sédimentologique :

La carotte 76 peut être décomposée en cinq parties:

- 0-60 cm: Vase gris foncé à varves noires très marquées.
- 60-275 » Vase grise sans varves.
- 275-308 » Les petits points noirs de monosulfures deviennent de plus en plus abondants.
- 308-341 » Les varves noires et grises font à nouveau leur apparition.
- 341-500 » Formation sablonneuse à varves beiges et jaunes, qui se poursuit, avec une fréquence de varves très variable jusqu'à la fin du sondage (500 cm).

Analyse palynologique :

Cette carotte débute dans le Subboréal:

- 0-150 cm: Subboréal à *Abies* et *Quercus*.
- 150-200 » Atlantique à *Quercus*, *Abies* et *Tilia*.
- 250-310 » Préboréal à *Pinus* et *Betula*.
- 330-350 » Alleröd à *Pinus* dominants.
- 350-370 » Older Dryas à *Hippophae* *Pinus*, *Abies*.
- 400-500 » Bölling à *Pinus* et *Artemisia*.

Nous n'avons pas trouvé le Younger Dryas. Peut-être est-il compris dans l'intervalle entre les échantillons où ont été identifiés le Préboréal et l'Alleröd.

On peut tirer les conclusions suivantes concernant ce profil n° 1:

- a) confirmation par carottage des données obtenues par le sondeur de vase.
- b) le réflecteur qui remonte à l'affleurement vers le centre du profil est un sédiment de type S_5 , sablonneux à varves granulométriques jaunes et beiges de densité toujours supérieure à 1,7 et d'âge Oldest Dryas. C'est le sédiment glacio-lacustre de E. JOUKOWSKY et J. P. BUFFLE (1938).
- c) les sédiments plus récents qui recouvrent ce réflecteur vers les côtes sont gris clair ou gris noir. Ils sont beaucoup plus riches en eau et en matières réductrices et contiennent plusieurs niveaux de varves noires d'oxydo-réduction.
- d) l'accumulation de sédiments sur les bords du bassin est à mettre en relation avec le substrat molassique de cette région du Petit-Lac. Les sédiments correspondants au réflecteur glacio-lacustre en se déposant ont épousé étroitement la morphologie des dépôts morainiques antérieurs.

Profil n° 2. Fig. 9, Baie de Sciez.

Le profil n° 2 est constitué par quatre carottes et par de nombreux dragages. Vers la côte, les sédiments superficiels sont sableux.

CAROTTE L 37: Longueur 210 cm, profondeur de prélèvement 32 m

Ce sondage renferme une vase grise assez homogène riche en coquilles. A 140 cm et jusqu'à 210 cm, la vase est striée de varves peu marquées. Tout le long de ce sondage, la teneur en eau est très élevée (supérieure à 100%) et le pouvoir réducteur est généralement supérieur à 2%. Il s'agit de vase se déposant au pied de l'algueiraie qui couvre la vaste zone peu profonde de la baie de Sciez.

CAROTTES L 62 et L 63

Ces sondages, implantés respectivement à 64 et 89 m, ont des coupes sédimentologiques et stratigraphiques voisines. On distingue en gros trois zones successives:

- 0 à 230 cm: Vase gris-bleu assez homogène de type S_1 et S_2 : les dépôts noirs sont plutôt à l'état ponctuel qu'à celui de couche continue.
- 230 à 500 cm: Les monosulfures de fer s'ordonnent en couches d'où des varves noires-grises S_3 . Il faut noter ici une certaine différence entre les deux carottes: alors que la L 63 présente des varves très marquées à microstrates très noires et serrées, la L 62 a une lamination beaucoup plus lâche, plus irrégulière et qui reste dans les tons gris.
- De 500 cm à la fin des carottes (640 cm pour L 63 et 600 cm pour la L 62) on entre dans la formation typique S_5 déjà décrite dans le Profil n° 1 à niveaux sablonneux intercalés de couches à granulométrie plus fine.

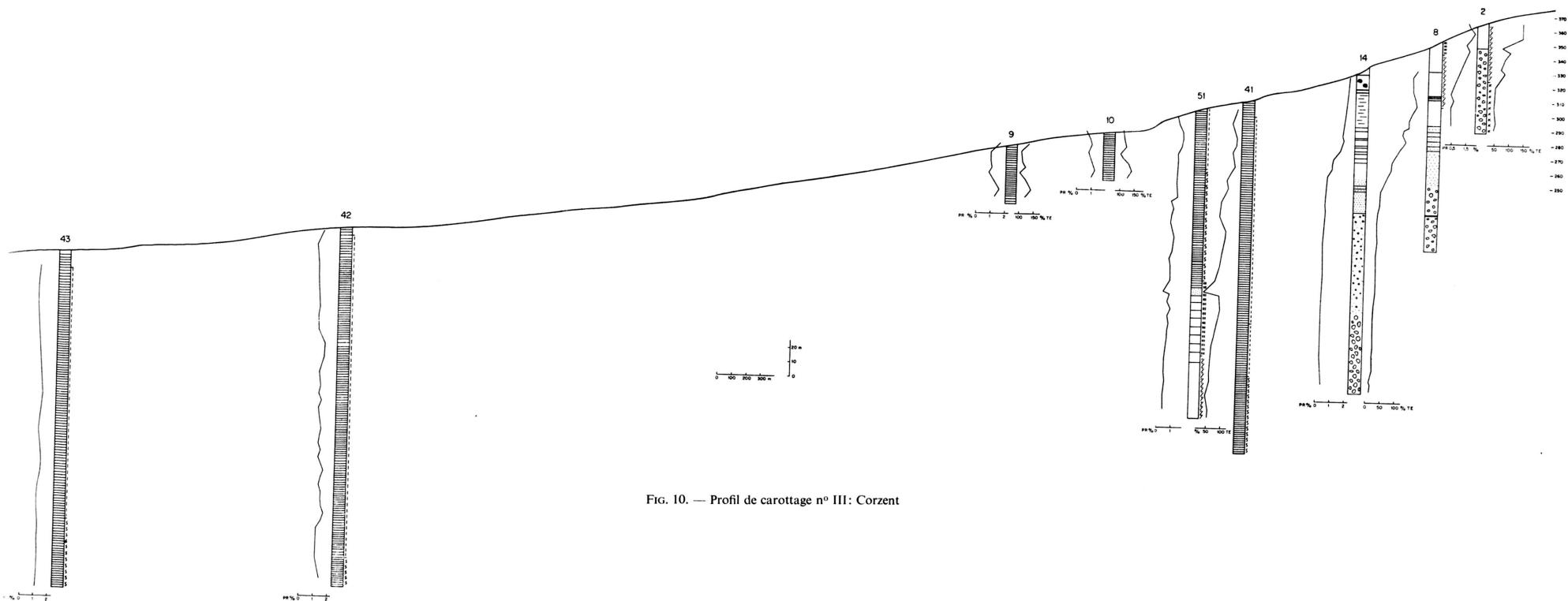


FIG. 10. — Profil de carottage n° III: Corzent

CAROTTE L 64: Longueur 217 cm, profondeur de prélèvement 116 m

La carotte L 64 traverse d'abord une formation S_2 puis à 70 cm entre dans la formation S_3 . Les varves d'abord lâches et peu accentuées deviennent serrées et denses à partir de 120 cm jusqu'à 200 cm. De 200 à 217 cm, le sédiment est homogène.

L'analyse palynologique de ces carottes n'a pas été effectuée mais par analogie avec le profil de Corzent (profil n° 3), analogie concernant aussi bien le faciès que la teneur en eau et le pouvoir réducteur, nous avons toutes les raisons de penser que la partie terminale des carottes L 62 et L 63 est dans la formation du Préboréal.

Corrélations des données du carottage et des données du sondeur de vase pour la baie de Sciez

Le sondeur de vase nous donne pour la baie de Sciez la répartition des sédiments suivante:

une couche de sédiments rubanés dont l'épaisseur augmente vers le large,
une zone de sédiments à faciès en pagodes, sous lesquels aucun réflecteur n'est visible.

A l'emplacement de la carotte L 62, la coupe du sondeur de vase est celle figurée sur le profil de la figure 9. La comparaison entre la carotte L 62 et la coupe de la zone où elle a été prélevée, nous permet de montrer l'excellente correspondance entre les résultats des deux techniques. En effet, là où le sondeur de vase indique 5,0 m de vase rubanée la coupe de la carotte montre 490 cm de vase varvée de densité voisine de 1,4. Cette formation varvée repose sur une couche compacte non varvée de densité 1,72 puis viennent les couches sablonneuses denses. D'après le sondeur, ces couches terminales appartiennent à la formation des pagodes. Les structures en pagodes semblent être liées à l'âge préboréal.

Profil n° 3. Fig. 10, la région de Corzent

Ce profil composé de neuf sondages donne une bonne coupe des sédiments superficiels de la côte française.

CAROTTE L 2: 150 cm de longueur, prélevée par 10 m de fond

- 0-30 cm: Vase grise homogène.
- 30-150 » Cette partie contient une fraction relativement importante de sable (2,5 à 15% des particules ont une taille supérieure à 40 microns). La teneur en eau souligne les variations granulométriques: de 140% dans la partie supérieure elle descend rapidement à 50%.

Ce sondage recoupe le Préboréal jusqu'à 75 cm. Au delà et jusqu'à la fin de la carotte il est dans le Dryas récent.

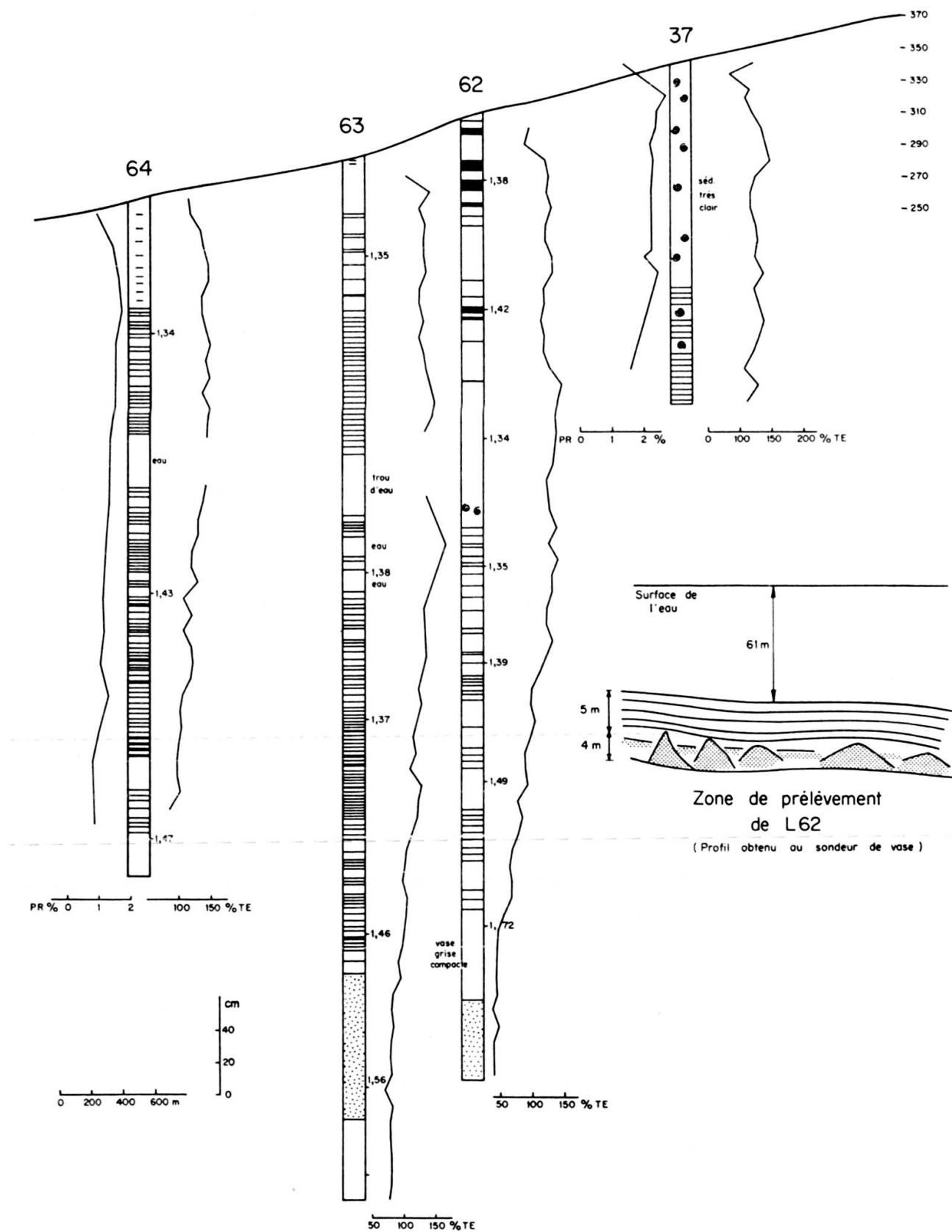


FIG. 9. — Profil de carottage N° II: Baie de Sciez

CAROTTE L 8: 250 cm de longueur, prélevée par 21 m de fond

- 0-110 cm: Vase gris-clair avec quelques rares passées charbonneuses à l'exception d'un niveau sableux à 40 cm.
- 110-250 » La fraction sableuse augmente sans cesse et atteint 21% à 250 cm. La surface du sondage présente l'association floristique caractéristique du Boréal. A partir de 15 cm on se trouve dans le Préboréal et le Dryas est atteint vers 150 cm.

CAROTTE L 44: Longueur 450 cm, profondeur de prélèvement 32 m

- 0-150 cm: Jusqu'à 150 cm la vase est grise et striée de varves plus ou moins accentuées. Un niveau coquiller a été rencontré dans la partie supérieure du sondage.
- La granulométrie reste très fine (2% de particules supérieures à 40 microns).
- 150-450 » La fraction grossière augmente nettement et à 435 cm 47% des particules sont supérieures à 40 microns.

Le premier niveau est d'âge atlantique. Au dessous un niveau très mince boréal; puis jusqu'à 200 cm la carotte recoupe l'époque préboréale, après quoi on atteint le Dryas.

CAROTTE L 41: Longueur 490 cm, profondeur de prélèvement 66m

CAROTTE L 51: Longueur 440 cm, profondeur de prélèvement 80 m

- 0-250 cm: Varves noires et grises bien marquées caractérisent ce sondage. A 250 cm, un niveau de sable grossier de quelques centimètres d'épaisseur interrompt cette microstratification; ce sable a 75% de ses éléments supérieurs à 40 microns.
- 250-350 » Les varves s'espacent et sont moins accentuées.
- 350-440 » La vase est gris-clair sans trace de varve.

L'analyse pollinique nous donne la stratification suivante:

- 0 à 84 cm: Subboréal-Subatlantique.
- 84-240 » Atlantique.
- 240-354 » Boréal.
- 354-440 » Préboréal.

CAROTTES L 10 et L 9

Ces deux carottes prélevées respectivement à 91 et 100 m sont très courtes, entièrement varvées; elles appartiennent à la période Subboréal-Subatlantique.

CAROTTE L 42: Longueur 500 cm, profondeur de prélèvement 170 m

Cette carotte, entièrement composée de vase varvée noire et grise à granulométrie très fine, se trouve jusqu'à 460 cm dans le Subboréal-Subatlantique à l'exception du niveau supérieur qui est actuel.

De 460 cm à la fin le sondage recoupe l'Atlantique.

CAROTTE L 43: Longueur 470 cm, profondeur de prélèvement 190 m

Tout comme la L 42, la L 43, entièrement varvée commence dans les sédiments actuels. A partir de 24 cm et jusqu'à 370 cm le sondage traverse le Subboréal-Subatlantique puis, jusqu'à la fin, reste dans l'Atlantique.

Corrélations des données du carottage et des données du sondeur de vase pour la région de Corzent

Ce profil présente deux particularités:

absence de sédiments récents jusqu'à 50 m de fond

épaisseur anormale de la formation Subboréale-Subatlantique dans la carotte L 41.

L'absence de sédiments récents dans les faibles bathymétries, nous avait fait craindre que le carottier ne préleve pas la partie supérieure du sédiment. Aussi avons nous utilisé le préleveur de surface Mortimer-Jenkins.

Cet appareil, véritable intermédiaire entre la bouteille de prélèvement d'eau et le carottier, préleve une colonne comportant 20 cm de vase et 40 cm de l'eau immédiatement sus-jacente. Lorsque l'opération est correctement effectuée l'interface vase-eau n'est même pas troublée. De cette manière, par suite de la continuité de la colonne vase-eau, il est impossible que la partie supérieure du sédiment échappe au prélèvement. Or, les toutes premières couches carottées par ce procédé n'ont fourni aucune association floristique correspondant à l'actuel mais bien une flore caractéristique du Préboréal ou du Boréal.

L'épaisseur importante du Subboréal-Subatlantique de la L 41 nous a engagés à rechercher si les enregistrements du sondeur de vase effectués dans cette région rendaient compte de cette particularité. Or, nous constatons que le Dryas qui forme le réflecteur principal a une surface très irrégulière: à certains endroits, celle-ci est déprimée de plusieurs mètres puis un bombement précède une nouvelle cuvette. Dans ces dépressions, les sédiments plus récents se sont accumulés et c'est dans un de ces creux de la topographie qu'a été implantée la L 41.

La cause des irrégularités de la surface du Dryas est inconnue: tassements différentiels, émersion et érosion ?

Profil n° 4. Fig. 11, région de Thonon

CAROTTES L 6 et L 23

Ces carottes implantées respectivement à 12 et 26 m de fond sont essentiellement formées de vase compacte gris clair et homogène. La carotte L 6 est particulièrement

riche en coquilles. La L 23 contient quelques rares varves et un niveau sableux à la base. Cette dernière carotte débute dans le Préboréal et s'achève dans le Dryas.

CAROTTE L 49: Longueur 340 cm, profondeur de prélèvement 30 m

- 0-140 cm Vase homogène, dense, gris clair et riche en coquilles.
 150-220 » Vase varvée mais les stratifications sont peu marquées et assez espacées sauf à 150 cm et de 210 à 220 cm.
 220-340 » Vase claire homogène et dure. La teneur en eau de cette dernière partie est voisine de 50% et son pouvoir réducteur est égal à 0,4%.

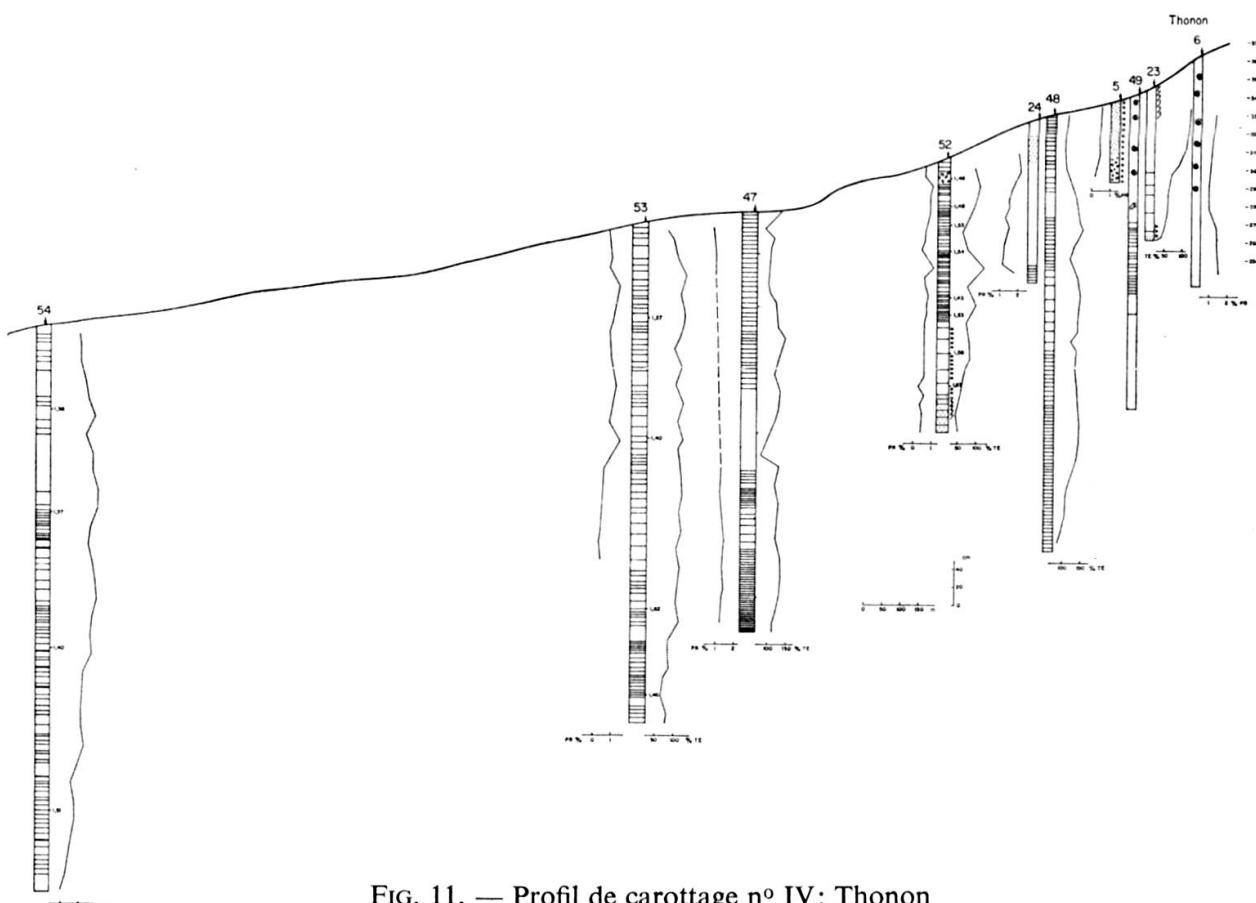


FIG. 11. — Profil de carottage n° IV: Thonon

CAROTTE L 5: Longueur 90 cm, profondeur de prélèvement 32 m

La carotte L 5 débute dans une vase à forte composante sableuse: 10 à 20% de ses éléments sont supérieurs à 40 microns. De 65 cm à la fin, la fraction détritique croît jusqu'à 35% et les éléments en sont beaucoup plus grossiers.

La carotte tout entière se situe dans le Dryas.

CAROTTE L 48: Longueur 490 cm, profondeur de prélèvement 40 m

Tout ce sondage est constitué d'une vase très fine et généralement à varves bien individualisées et à microstrates très noires. Font exception les niveaux 60 à 85 cm

à varves rares et peu distinctes; 85 à 115 cm sans varves du tout et 170 à 260 cm à varves espacées et peu accentuées.

La teneur en eau reste élevée: de 100 à 150%.

CAROTTE L 24: Longueur 180 cm, profondeur de prélèvement 42 m

Cette carotte, à part un niveau sableux à 40 cm, est formée d'une vase très fine. Sa teneur en eau voisine de 150% vers le sommet s'abaisse à 73% à la base. De même le pouvoir réducteur supérieur à 2% à 40 cm décroît jusqu'à 1,17% à 160 cm.

CAROTTE L 52: Longueur 300 cm, profondeur de prélèvement 75 m

0-185 cm: Varves peu distinctes au sommet mais très caractéristiques au-dessous. De plus, de 20 à 35 cm, nombreux petits amas charbonneux.

185-260 » Les varves s'espacent et deviennent moins marquées, la densité augmente: on entre probablement là dans le Boréal.

260-300 » Le sédiment est gris clair, encore légèrement varvé et a tendance à devenir un peu plus sableux.

CAROTTE L 47: Longueur 460 cm, profondeur de prélèvement 90 m

Cette carotte est presqu'entièrement varvée à l'exception de la zone entre 190 et 280 cm. La teneur en eau oscille autour de 100% et le pouvoir réducteur est voisin de 1%.

CAROTTE L 53: Longueur 540 cm, profondeur de prélèvement 100 m

Comme la carotte précédente, la L 53 est presque entièrement varvée. Les varves sont peu accentuées jusqu'à 410 cm mais de 410 cm à la fin elles sont fines, denses et à microstrates très noires. La teneur en eau oscille entre 100 et 125%. A la base, elle descend à 75%.

CAROTTE L 54: Longueur 622 cm, profondeur de prélèvement 162 m

0-120 cm: Varves lâches et peu marquées.

120-180 » Vase grise homogène, sans varves.

180-610 » Vase varvée caractéristique. Le niveau 247 cm se distingue par une couche noire oblique, placée entre deux autres couches noires horizontales. A partir de 500 cm les varves diminuent d'intensité.

610-622 » Vase compacte.

La teneur en eau oscille entre 100 et 150%. A la base de la carotte, elle descend à 50%.

Profil n° 6. Fig. 12, région d'Evian

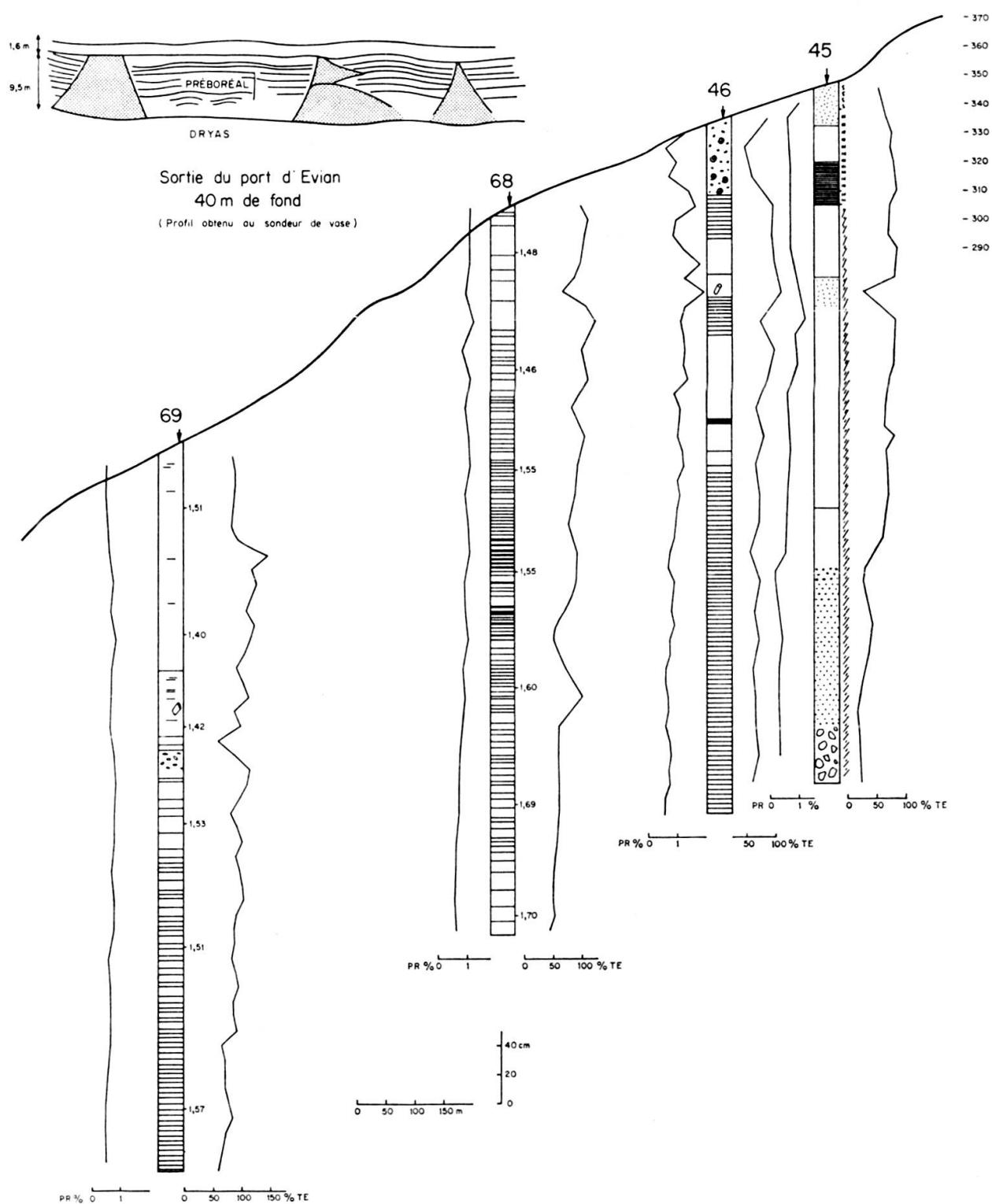


FIG. 12. — Profil de carottage n° VI: Evian.

CAROTTE L 45: Longueur 480 cm, profondeur de prélèvement 25 m

- 0-330 cm: Vase compacte gris clair et homogène. Des niveaux sableux importants en interrompent la monotonie spécialement de 0 à 30 cm et de 130 à 150 cm. De 50 à 80 cm notons une passée plus charbonneuse.
- 330-440 » Le sédiment devient de plus en plus sableux.
- 440-480 » Il contient des galets anguleux de plusieurs centimètres.

Les 15 premiers centimètres indiquent le début de l'Atlantique, le Boréal est représenté par 60 cm seulement puis au delà, de 80 cm jusqu'à la fin, le sondage reste dans le Préboréal.

La particularité qu'offre cette carotte réside dans l'épaisseur importante du Préboréal si nous la comparons avec celle trouvée dans la baie de Sciez par exemple. Or, si nous regardons la coupe du sondeur de vase devant Evian, nous voyons en effet que le Préboréal, que nous avons identifié à la formation des pagodes, a ici près de 10 m d'épaisseur. Là encore nous constatons l'excellente concordance entre les données des deux méthodes.

CAROTTE L 46: Longueur 480 cm, profondeur de prélèvement 37 m

- 0-50 cm: Sable coquiller.
- 50-230 » Alternance de zones varvées avec des zones de vase grise homogène.
A 120 cm un morceau de bois fossile a été récupéré et à 210 cm une passée très charbonneuse tranche nettement.
- 230-480 » Vase entièrement varvée.

La teneur en eau, de 100% dans la partie supérieure, est voisine de 50% à la base.

Cette carotte débute dans le Subboréal.

CAROTTE L 68: Longueur 500 cm, profondeur de prélèvement 67 m

Cette carotte à varves lâches jusqu'à 120 cm présente ensuite jusqu'à 400 cm un magnifique exemple de séries de varves très bien individualisées. De 400 cm à la fin les varves s'estompent en atteignant le Boréal ce qui est confirmé par l'augmentation importante de la densité (1,7).

CAROTTE L 69: Longueur 500 cm, profondeur de prélèvement 150 m

- 0-240 cm: Varves rares au sommet, abondantes ensuite. Par endroits, les monosulfures forment des grains, à d'autres ils forment vraiment de petites couches. Au niveau 173 cm un morceau de bois a été trouvé.
- 240-500 » La carotte est entièrement varvée. Sa teneur en eau reste élevée et la densité ne dépasse pas 1,57.

Profil n° 7. Région de Saint-Sulpice, fig. 13

Les trois carottes de ce profil L 66, L 67 et L 65 prélevées respectivement à 70, 110 et 154 m, sont toutes trois formées de vase varvée. La L 66 et la L 67, plus

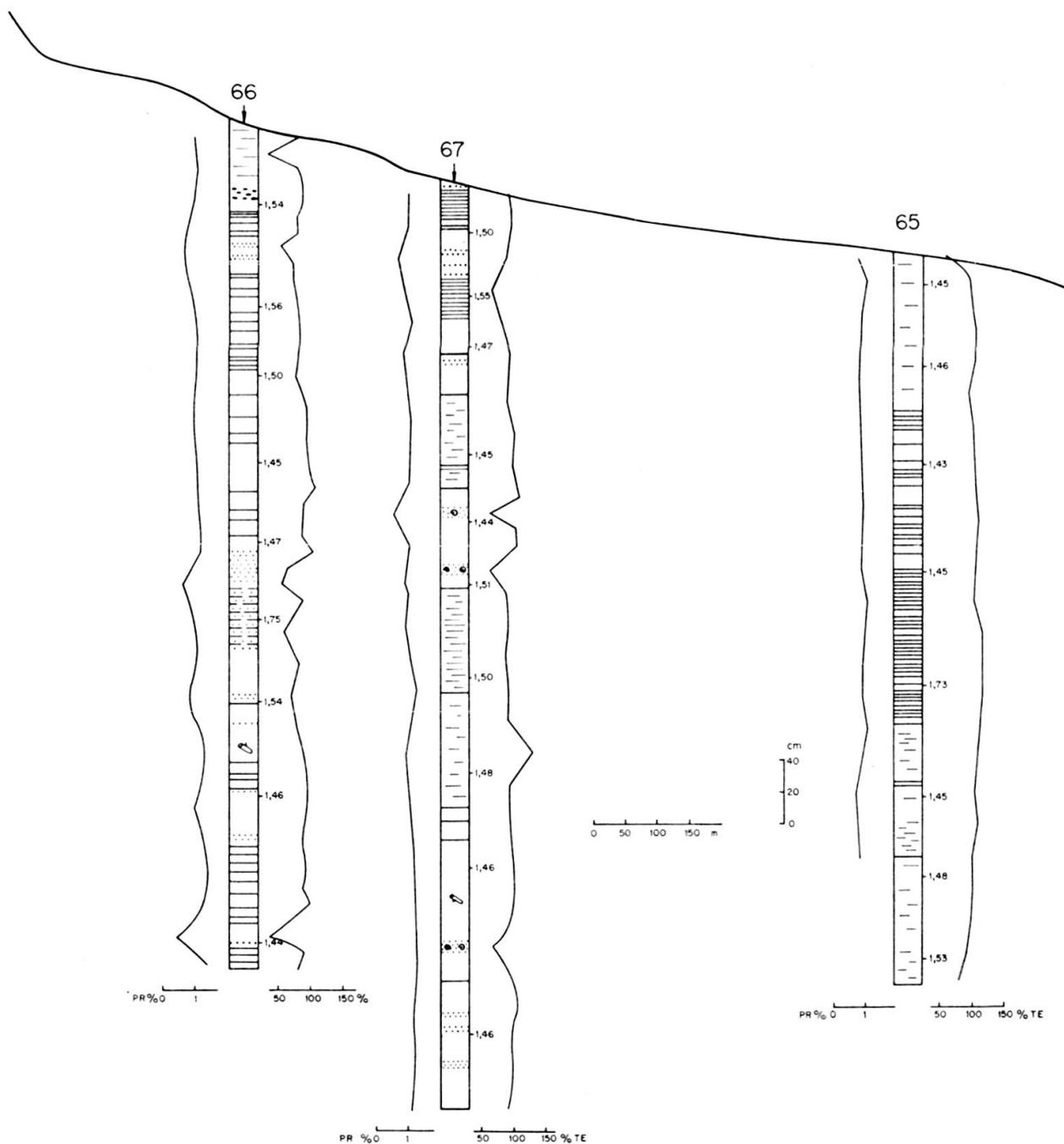


FIG. 13. — Profil de carottage n° VII: St. Sulpice

côtières, ont des varves généralement peu marquées, intercalées de nombreux niveaux sableux et coquillers. Des fragments de bois ont été récupérés et celui de la L 66, niveau 395 cm, était suffisamment important pour faire l'objet d'une datation par le C¹⁴.

La teneur en eau de la L 67 oscille autour de 100% et celle de la L 66 plus sableuse est voisine de 75%.

La L 65 présente des varves beaucoup plus nettes sauf à ses deux extrémités. Sa teneur en eau assez uniforme est voisine de 110%.

Profil n° 8. Région de Saint-Prex, fig. 14

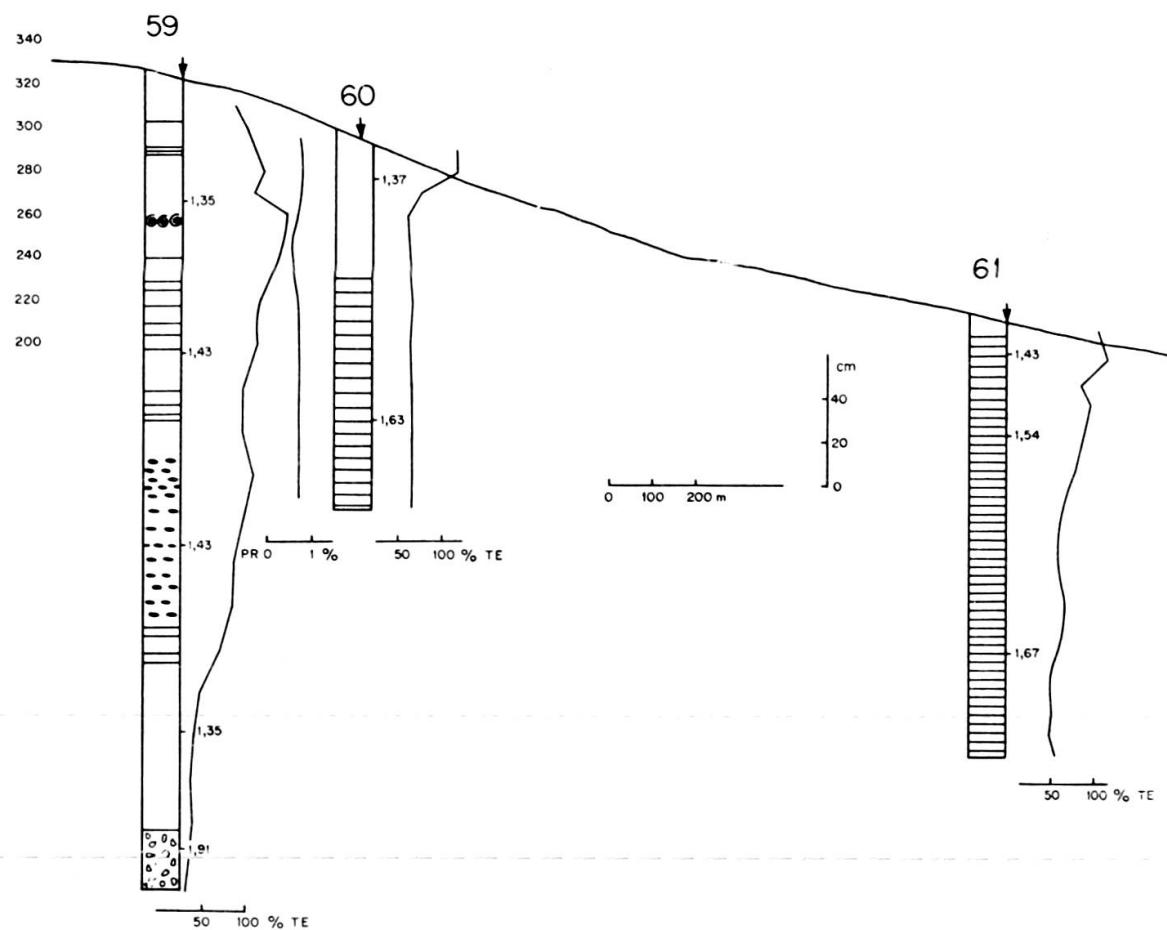


FIG. 14. — Profil de carottage n° VIII: St. Prex

CAROTTE L 59: Longueur 380 cm, profondeur de prélèvement 50 m

- 0-160 cm varves peu marquées.
- 160-270 » Granules noirs dispersés dans la vase.
- 270-350 » Vase gris clair et dure.
- 350-380 » La vase contient de nombreux graviers.

CAROTTE L 60: Longueur 175 cm, profondeur de prélèvement 78 m

La vase, au sommet de ce sondage, est presque liquide puis elle devient très compacte à partir de 25 cm. Vers 70 cm et jusqu'à la base, cette vase dure est striée de zones noirâtres mal délimitées.

A l'exception de la partie supérieure, la teneur en eau est voisine de 50%.

CAROTTE L 61: Longueur 200 cm, profondeur de prélèvement 160 m

Cette carotte légèrement varvée au sommet est homogène et plus compacte ensuite. Sa teneur en eau décroît de 125 à 50%.

Profil n° 9. Région de Rolle, fig. 15

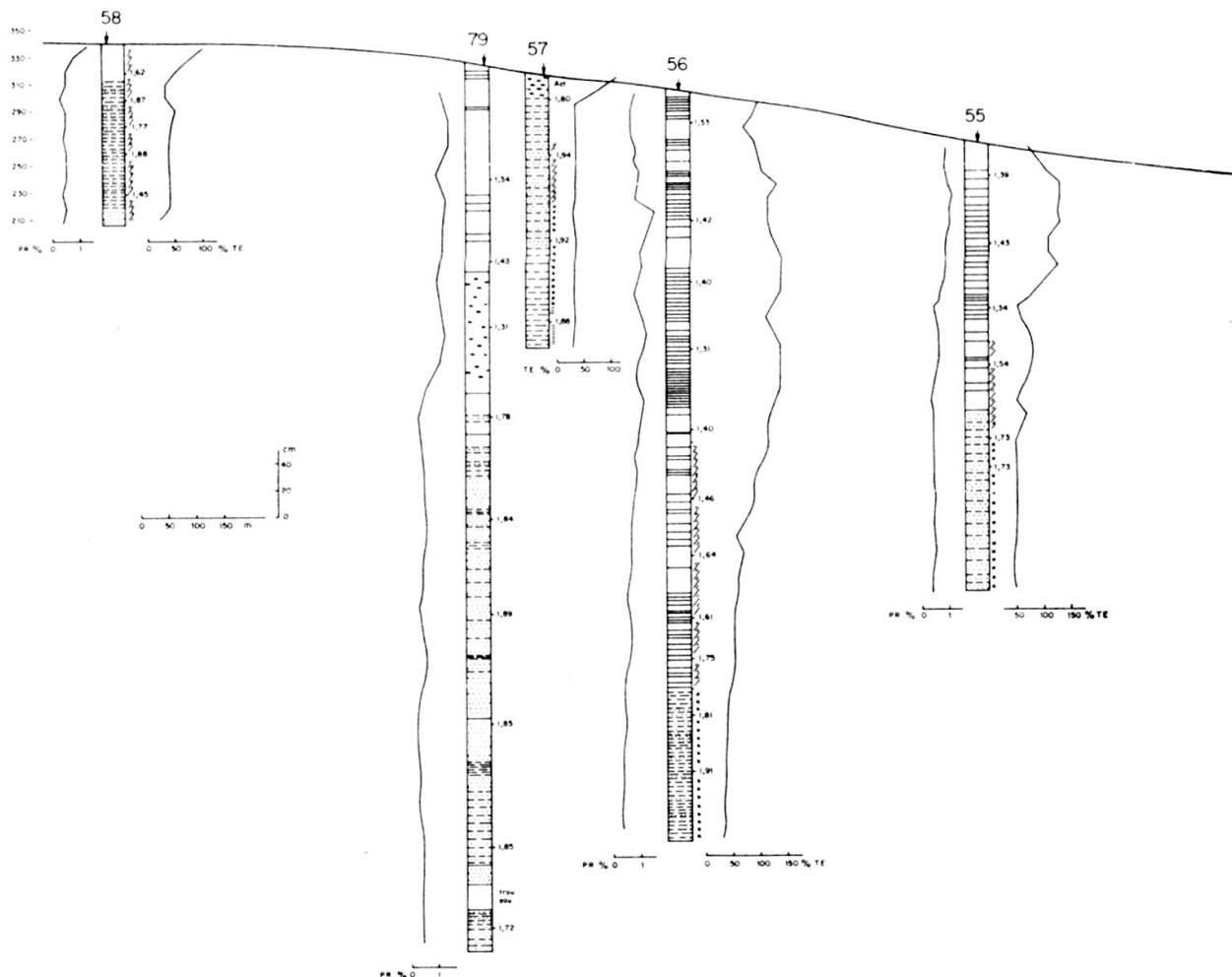


FIG. 15. — Profil de carottage n° IX: Rolle

CAROTTE L 58: Longueur 130 cm, profondeur de prélèvement 32 m

Après quelques niveaux faiblement varvés au sommet, cette carotte traverse une formation gris clair ou beige, homogène, à passées sableuses fréquentes, d'un millimètre d'épaisseur. La base est composée de sable franc.

Toute cette carotte se situe dans le Préboréal.

CAROTTE L 79: Longueur 650 cm, profondeur de prélèvement 49 m

0-15 cm: Vase grise à passées noires.

15-80 » Vase gris clair.

- 80-120 cm; Zone plus foncée avec quelques varves.
 120-230 » Sédiment gris foncé sans varves définies mais avec de nombreux granules noirs.
 230-650 » Vase sablo-argileuse micro-stratifiée à petits lits de sablons compris entre des lits argileux. La fréquence de ces laminae est très variable. En général, l'épaisseur des niveaux sableux a tendance à augmenter vers le bas.

La teneur en eau de cette carotte ne dépasse pas 50% et descend même à 35% à la base. La densité est élevée: 1,85.

CAROTTE L 57: Longueur 200 cm, profondeur de prélèvement 56 m

- 0-20 cm: Vase à granules noirs dispersés dans une vase grise.
 20-200 » Formation sablo-argileuse déjà décrite dans la carotte L 79.

Le sommet de cette carotte représente un sédiment actuel. Jusqu'à 100 cm le sondage recoupe le Préboréal puis au delà entre dans le Younger Dryas. A 170 cm la flore indique un réchauffement pouvant correspondre à l'interstade d'Alleröd.

CAROTTE L 56: Longueur 550 cm, profondeur de prélèvement 68 m

Trois parties sont à distinguer dans cette carotte:

- 0 à 240 cm: Vase varvée caractéristique.
 240 à 440 » Les varves s'espacent et sont moins noires.
 440 à la fin: Formation sablo-argileuse beige clair identique aux carottes précédentes.

La deuxième partie de cette carotte traverse le Préboréal, la dernière recoupe le Dryas.

CAROTTE L 55: Longueur 330 cm, profondeur de prélèvement 104 m

Une formation à varves lâches du Préboréal est suivie du Dryas sablo-argileux.

Profil n° 10. Profil Nord-Sud situé à l'Est de Rolle, fig. 16.

CAROTTE L 55: décrite dans le profil précédent.

CAROTTE L 73: Longueur 700 cm, profondeur de prélèvement 134 m

La première partie de cette carotte est abondamment varvée à l'exception des niveaux 138 à 200 cm sablonneux. Au delà de 400 cm on entre dans la formation argilo-sablonneuse qui constitue la base des carottes du profil précédent et qui est ici aussi de l'époque du Dryas.

CAROTTE L 80: Longueur 695 cm, profondeur de prélèvement 146 m

- 0-300 cm: Zone peu varvée et même pas du tout.
 300-500 » Certains niveaux à formation plus varvée.

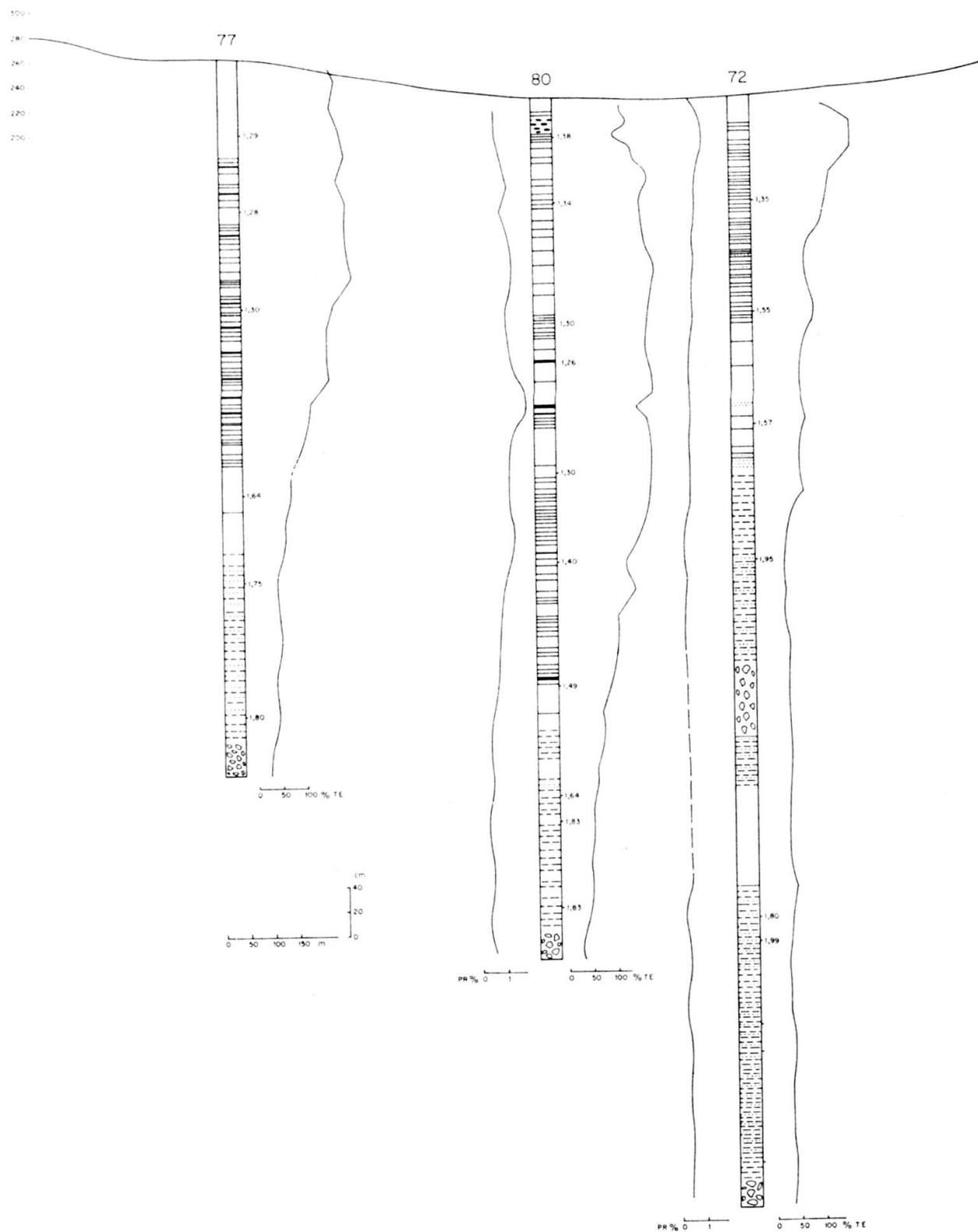


FIG. 16. — Profil de carottage n° X.

500-600 cm; Vase grise sans varves.

600-695 » C'est le Dryas sablo-argileux. La base de la carotte contient plusieurs gros galets.

Profil n° 11. Au large de Rolle, orienté Nord-Est — Sud-Ouest, fig. 17

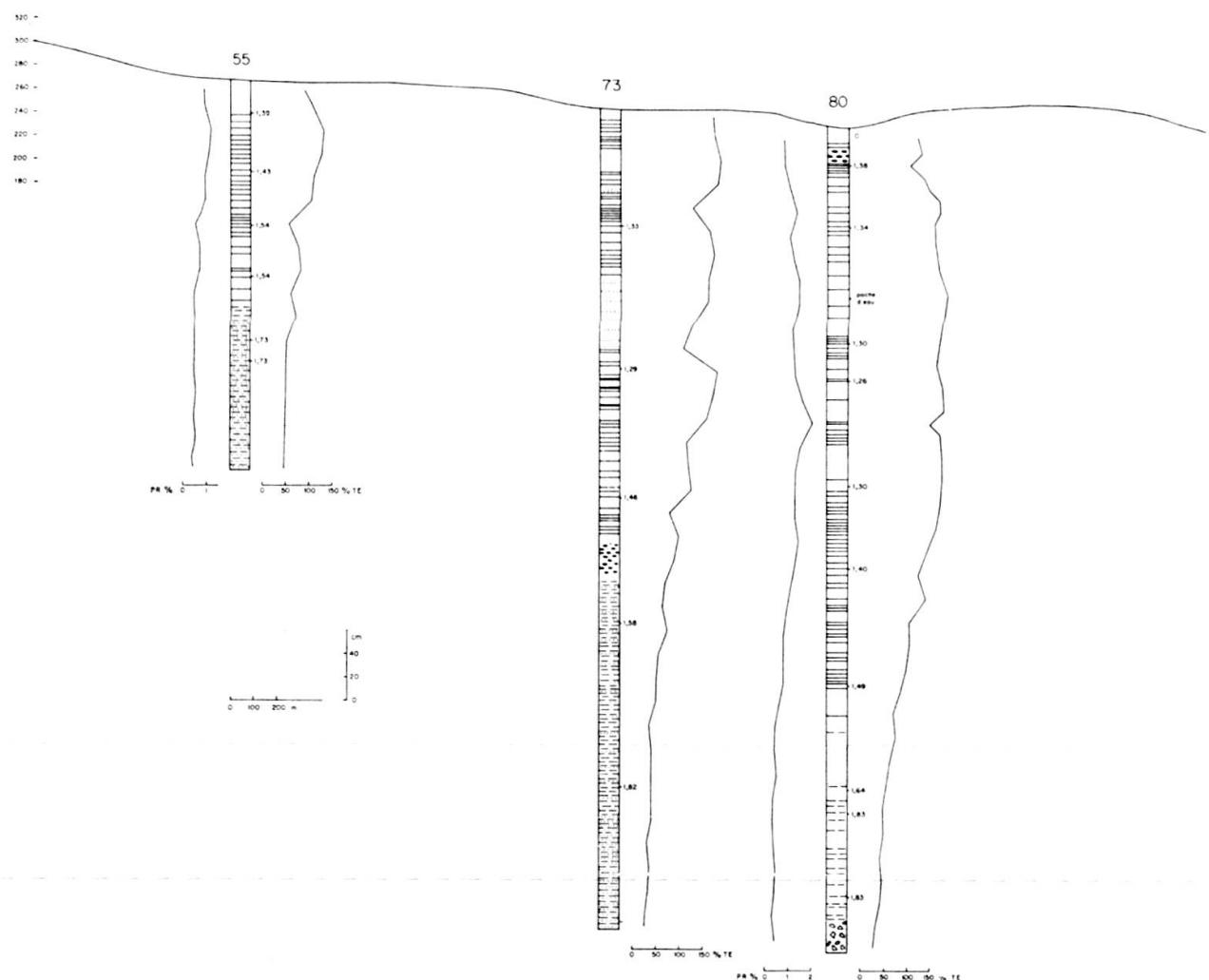


FIG. 17. — Profil de carottage n° XI

La carotte L 80 qui forme le centre de ce profil a déjà été décrite dans le profil précédent. La L 77 a une coupe tout à fait comparable.

CAROTTE L 72: Longueur 900 cm, profondeur de prélèvement 156 m

0-190 cm: Varves et microstrates très noires intercalées de niveaux sablonneux fréquents.

190-300 » Vase homogène sans varve.

300-900 » Formation sablo-argileuse beige et jaune.

A 460 cm d'une part, à 880 cm de l'autre, des galets de schistes micacés ont été récoltés.

CONCLUSIONS

Les périodes climatiques et les lithofaciès

DRYAS

Oldest Dryas : Ce niveau, atteint dans le sondage L 74, correspond à une période encore très froide et sèche. Les espèces silvatiques sont rares. Artémisia domine, le Pin est secondaire. Quelques graminées complètent le spectre végétal. La fréquence pollinique est très faible.

Les dépôts sédimentaires correspondant à cette période sont formés de lits de sable épais séparés par des niveaux argileux jaune clair très minces.

Bölling : Ce niveau correspond à un réchauffement notable qui amène la dominance du Pin. Les Artémisia et les graminées deviennent secondaires. La fréquence pollinique est plus élevée qu'à la période précédente.

Les dépôts ressemblent à ceux de l'Oldest Dryas, cependant les intercalations argileuses jaune clair sont plus épaisses. Ces dépôts dépassent 1 m d'épaisseur dans le Petit-Lac.

Older Dryas : Une nouvelle offensive du froid, moins sévère et plus courte que celle de l'Oldest Dryas entraîne le développement prépondérant d'Hippophae; le Pin est alors secondaire ainsi que le Bouleau. Ce niveau ne représente que 20 à 30 cm dans le Petit-Lac. Nous l'avons trouvé beaucoup plus épais, 1 m environ au large de Thonon.

Le sédiment est toujours sablo-argileux et de couleur claire.

Alleröd : Les glaciers reculent à nouveau et le Pin et le Bouleau se développent suivis d'Hippophae et d'Artémisia.

Younger Dryas : Une dernière période froide, très courte, amène la montée du Bouleau aux dépens du Pin.

Les sondages ne sont pas assez nombreux pour que l'on puisse dessiner sur une carte le toit du Dryas. Cependant, les carottes dans lesquelles il a pu être atteint sont toutes situées à l'Ouest d'une ligne Amphion-Morges. Le Dryas est donc recouvert par des sédiments moins épais dans la région occidentale du lac que dans la zone orientale. A Evian, même la L 45 pourtant très côtière, 25 m de fond, n'atteint pas le Dryas.

La tendance à l'enfoncement de la zone orientale, qui s'accompagne d'une accumulation sédimentaire, se poursuit donc dans le Quaternaire tout à fait récent : le Préboréal ne dépassant pas 4 m par 61 m de fond en baie de Sciez atteint presque 10 m d'épaisseur par 25 m de fond à Evian, alors que la pente est ici beaucoup plus importante que là.

PRÉBORÉAL

Au Préboréal le climat s'adoucit un peu et le pin se développe aux dépens du bouleau.

Le sédiment préboréal est une vase gris-clair sans varve ou avec des varves très peu marquées (type S_1 bis). Sa densité est généralement assez élevée (1,80 environ) et sa base peut être sableuse.

C'est à cette formation que nous avons été amenés à rattacher les couches à structures en pagodes trouvées au sondeur de vase. Ces pagodes sont liées à des augmentations locales de la densité mais, par suite de la difficulté de savoir si un sédiment préboréal a été prélevé dans une structure en pagode ou entre deux de celles-ci, il est pour le moment impossible de dire si cette augmentation de densité correspond à un tassement local plus important de la vase ou bien à une granulométrie différente. Nous avons vu que son épaisseur peut varier beaucoup et atteindre 10 m.

BORÉAL

Le réchauffement s'accentue, il tombe encore beaucoup de neige en hiver, mais les moyennes thermiques annuelles sont assez clémentes pour que se développent l'orme et le coudrier au milieu des pins toujours dominants.

La différence lithologique essentielle avec le sédiment préboréal est la présence de varves espacées (L 51) et même parfois de passées plus noirâtres. Il correspond au sédiment que nous avons décrit comme S_2 .

Le Boréal n'est pas très épais, il représente environ 1 mètre.

ATLANTIQUE

Le climat chaud et humide de cette période qui s'étend sur le Ve et la IV^e millénaire A.C., lui a valu le nom d'Optimum climatique. Les Ormes, Chênes, Tilleuls et Coudriers gagnent du terrain.

La lithologie reflète fidèlement cet adoucissement climatique: les varves sont très serrées, très noires, la teneur en eau est élevée. C'est le sédiment de type S_3 .

L'épaisseur de cette formation est de l'ordre de 2 m.

SUBBORÉAL — SUBATLANTIQUE-ACTUEL

A la fin de l'Atlantique arrivent sur les bords du Léman des hommes qui savent cultiver les céréales et élever le bétail et qui construisent des villages sur pilotis. Sans prendre parti dans la querelle du caractère palustre ou lacustre des habitations il faut noter que celles-ci ont occupé les rives des grands lacs suisses pendant le Néolithique et l'Age du Bronze à la fin duquel elles ont disparu brusquement.

Les sédiments qui se déposent pendant cette période dans la partie occidentale du Grand Lac sont très fins: les varves d'oxydo-réduction sont encore nettes. Cependant, les microcouches noires sont moins fréquentes et moins foncées que pendant la période atlantique.

L'épaisseur de ces dépôts, Subboréal-Subatlantique actuel, est de 3 à 4 m.

Les épaisseurs qui ont été mentionnées précédemment concernent surtout les sédiments de la région occidentale du Grand-Lac. Nous voyons que la série post-Dryas a une épaisseur de 10 à 15 m.

CHAPITRE IV

CARACTÉRISTIQUES DE LA SÉDIMENTATION POSTGLACIAIRE

A. *Le Carbonate de Calcium des Sédiments*

Cette question ayant déjà fait l'objet d'une publication (SERRUYA et VERGNAUD-GRAZZINI 1967), nous n'en donnerons ici qu'un résumé.

1^o *Les teneurs en CO³Ca*

Elles ont été déterminées au calcimètre Bernard amélioré. Plus de 500 mesures ont été effectuées.

Pour essayer d'interpréter ces mesures, nous avons déterminé dans chaque courbe, des tranches correspondant à des valeurs homogènes puis nous avons réparti les tranches ainsi obtenues d'après le faciès lithologique du sédiment. Plusieurs observations intéressantes peuvent en être déduites:

- a) Les valeurs mesurées sont en général beaucoup plus faibles que celles rapportées par E. JOUKOWSKY et J. P. BUFFLE (1938) dans les sédiments du Petit-Lac. La différence est surtout sensible pour les sédiments récents. Alors que dans les sédiments du Petit-Lac la craie lacustre peut contenir 70% de CO³Ca, dans le Grand-Lac la valeur moyenne est de 30%. La différence des méthodes employées ne rend pas compte de tels écarts. Les valeurs du Petit-Lac sont par contre très voisines de celles qui ont été mesurées dans les sédiments récents du Lac de Nantua.
- b) Les teneurs en carbonate de calcium sont en général plus élevées dans les sédiments à varves nombreuses que dans les sédiments peu varvés. On peut trouver dans les sédiments de la première catégorie des microstrates entièrement blanches, particulièrement riches en calcaire. A Nantua ces varves blanches arrivent à contenir 90% de carbonate de calcium.

- c) Les sédiments des grandes profondeurs sont généralement moins riches en calcaire même s'ils appartiennent au type varvé: il y a probablement un phénomène de redissolution.
- d) Les sédiments détritiques du Dryas ont des teneurs en carbonates assez importantes.

2^o *L'origine du CO³Ca des sédiments*

Quelle est l'origine du carbonate de calcium que nous rencontrons dans ces sédiments? Chimique, détritique? Cette origine a-t-elle varié au cours de la période post-glaciaire?

Nous nous sommes adressés à deux techniques qui, en nous informant sur la structure même du réseau cristallin et sur la composition des atomes du carbonate, nous font toucher de plus près la dynamique même du dépôt.

3^o *Les informations données par la thermoluminescence*

Plusieurs échantillons provenant de la carotte L 2 ont été soumis au Laboratoire de Géologie Nucléaire de Pise pour mesure de la thermoluminescence. Les courbes enregistrées présentaient le pic 300^o C de la calcite et l'intensité de celui-ci croissait avec la profondeur des niveaux.

Quelles sont les causes possibles de ce phénomène dans les sédiments lémaniques?

a) *Les défauts de réseau*: Ils sont provoqués soit par des pressions mécaniques exercées sur le réseau cristallin soit par des substitutions d'ions à l'intérieur de celui-ci. On put établir, au laboratoire de spectrométrie par résonance paramagnétique électronique de l'Institut Battelle de Genève, que dans le réseau de la calcite des sédiments tardiglaciaires, se produisaient des substitutions de l'ion Ca⁺⁺ par l'ion Mn⁺⁺. Or le rôle d'activateur du Mn dans la luminescence de la calcite est connu depuis longtemps. (PRINGSHEIM 1928, MEDLIN 1959).

b) *La radioactivité naturelle des sédiments*: P. OLIVE, du Laboratoire de Géologie Dynamique de Paris a bien voulu doser, par spectrométrie gamma, le Potassium et le Thorium des sédiments des carottes L 7, L 41 et L 43. Le principe de la mesure ainsi que les détails de l'appareillage ont déjà été décrits (CHEMINEE et NORDMANN 1963).

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau n^o III. La teneur en K est voisine de 2% et celle du Th est comprise entre 4 et 6,5 ppm. Ces valeurs sont nettement dépassées à certains niveaux soulignés sur le tableau. Les maxima de la L 7 correspondent à un sédiment d'âge boréal; le maximum de la L 43 est situé à la limite Atlantique-Subboréal. C'est aussi à un sédiment du début du Subboréal qu'est rattaché le maximum de Th de la L 41.

Bien que la radioactivité due à ces éléments ne soit pas négligeable, il est peu probable qu'elle puisse modifier le réseau cristallin de la calcite. Il faudrait pour cela

TABLEAU III
Teneur en K et en Th des sédiments

Carotte L 43			Carotte L 7		
Niveaux cm	K %	Th ppm	Niveaux cm	K %	Th ppm
20-25	2,1		0-25	1,9	6,1
25-50	2,1		25-45	4,7	11,4
51-75	1,6		45-65	2,2	4,0
201-225	2,2	4,0	65-85	4,0	11,7
226-250	2,0	5,5	85-105	1,9	4,4
251-275	1,9	6,0	105-125	2,0	5,1
276-300	1,7	6,4	125-145	2,2	6,7
301-325	1,8	3,8	145-165	2,0	7,9
326-350	1,9	5,3	165-185	2,0	6,0
351-375	3,7	<i>18,0</i>			
375-400	2,0	9,3			
400-425	1,8	6,2			
426-450	1,8	6,3			
451-470	1,6	6,3			
470-480	1,6				

Les valeurs *en italique* correspondent aux valeurs maxima.

Le K a été dosé à + ou — 20% et le thorium à + ou — 20 ppm.

que les atomes radioactifs soient situés dans la calcite même (ZELLER 1954). Or dans les sédiments lémaniques, ceux-ci sont plutôt associés à la fraction détritique non calcaire.

c) *Héritage* : Les calcaires alpins ou chablaisiens présentent tous des pics importants de thermoluminescence. Les fragments de ces roches, contenues dans les sédiments, présenteront naturellement une thermoluminescence héritée.

Etude des courbes enregistrées

Au cours d'un stage au Laboratoire de géologie nucléaire de Pise, nous avons pu enregistrer 56 courbes sur 6 carottes différentes qui couvrent toute l'époque tardi- et post-glaciaire. La L 44 qui débute dans l'Atlantique et s'achève dans le Dryas, donne une bonne idée de l'évolution des carbonates dans le temps. Si, tout le long de la carotte, la calcimétrie totale ne varie guère, le pourcentage du calcaire fin diminue avec la profondeur alors que le calcaire grossier ne cesse de croître. Les sédiments de la L 44, comme d'ailleurs ceux des autres carottes étudiées, présentent le pic 270-300° C de la calcite.

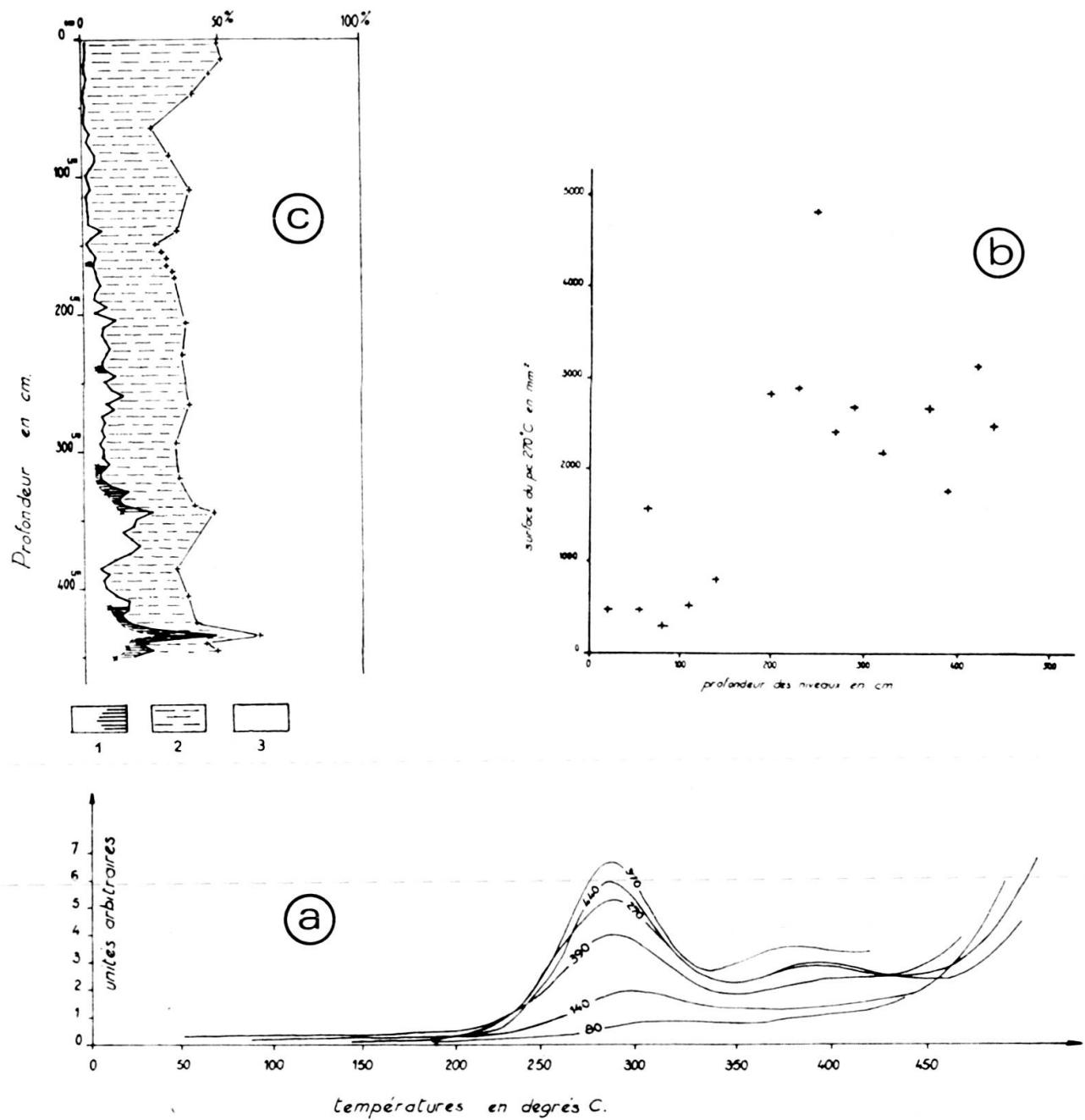


FIG. 18. — Profil granulométrique et courbes de thermoluminescence de la calcite de la carotte L 44.
 a: intensité des pics de thermoluminescence. Les nombres indiqués sur les courbes correspondent à la profondeur des niveaux.

b: surface des pics 270°C en fonction de la profondeur des niveaux.

c: profil granulométrique.

1 = fraction supérieure à 40 microns; la partie hachurée correspond au calcaire grossier.
 2 = calcaire fin. 3 = fraction fine non calcaire.

La figure n° 18 a montre qu'en général l'intensité du pic croît avec la profondeur des niveaux.

L'exposition de plusieurs échantillons de cette carotte pendant 16 heures aux radiations γ du Strontium 90 a provoqué:

un renforcement du pic 270° C

l'apparition d'un pic 140° C de très grande intensité dans les niveaux inférieurs et d'intensité moyenne dans les niveaux supérieurs.

L'exposition simultanée de vases très calcaires du lac de Nantua a eu un effet nul. Il semble donc bien que, dans le Léman, les impuretés de la calcite, particulièrement celles des niveaux inférieurs, soient à l'origine de l'existence de nombreux pièges à électrons qui sont révélés par les radiations γ servant d'excitateur.

Si, sur un système d'axes, nous portons la surface des pics 270° C obtenue par planimétrie, en fonction de la profondeur, nous voyons que les points se répartissent en deux groupes très distincts, la coupure se situant vers 150 cm. Au dessous de 150 cm, les pics sont peu importants, au-delà ils ne cessent de croître (figure 18 b) et il n'existe pas de valeur de transition entre ces deux groupes de valeurs.

Or, nous voyons que ce niveau 150 cm correspond à d'importantes modifications sédimentologiques: augmentation de la granulométrie avec apparition du calcaire grossier, diminution importante de la teneur en eau et du pouvoir réducteur. Ce niveau 150 cm correspond à la limite entre les vases fines du Préboréal et les sédiments grossiers du Dryas. L'apparition concomittante des sédiments grossiers et des pics de thermoluminescence n'est certainement pas fortuite et nous en proposons l'interprétation ci-après.

Les glaces de la dernière avancée froide du Dryas ont apporté une quantité importante de matériaux détritiques; leur fraction calcaire formant environ 40% du sédiment provenait essentiellement de l'érosion des formations calcaires alpines qui présentent une forte thermoluminescence. Il semblerait donc que les pics qu'on observe dans les sédiments du Dryas correspondent à une thermoluminescence « héritée ».

Ensuite, pendant le Préboréal et les époques suivantes,
la diminution de la capacité de transport à cause de la disparition des glaces (le Rhône n'amène jamais actuellement au large de Thonon les galets valaisans qu'on trouve dans les sédiments du Dryas),

le réchauffement climatique favorisant la précipitation chimique ou biochimique du carbonate de calcium,

ont provoqué un renversement des conditions de sédimentation. Le remplacement progressif des carbonates détritiques par les carbonates de néoformation serait responsable de la diminution puis de la disparition des pics de thermoluminescence. Ceci concorderait avec l'observation faite sur les carbonates biochimiques de Nantua: ces derniers, dus à l'activité photosynthétique des algues planctoniques, ne présentent aucun phénomène de thermoluminescence naturelle ou artificielle (S. SERRUYA 1964).

4^o *Les informations fournies par la composition isotopique de l'oxygène et du carbone des carbonates :*

On observe une diminution croissante des isotopes lourds dans les niveaux supérieurs, le δO^{18} passant de $-5,40$ pour les niveaux inférieurs à $-10,70$ pour le niveau de surface et le δC^{13} passant pour les mêmes niveaux de $+1,00$ à $-2,00$. Cette évolution est due à un remplacement progressif des calcaires d'origine marine par des calcaires de néoformation déposés en eau douce et dans un milieu en voie de réchauffement. Dans le Léman, il y a donc eu, depuis le début du Postglaciaire, une profonde modification de la fraction carbonatée du sédiment.

B. Répartition des Sédiments

Un trait frappant de la sédimentation lémanique est la présence très restreinte ou l'absence complète de sédiments récents dans les zones côtières du bassin. Le sommet des carottes côtières est généralement dans le Préboréal ou le Boréal à l'exception de certaines régions de la rive suisse où il semble y avoir une accumulation locale de sédiments actuels reposant sur du Préboréal (Carotte L 57).

Trois phénomènes peuvent expliquer ce caractère:

1^o *Des courants*

Les courants remanieraient les sédiments qui se déposent dans les régions côtières. En faveur de cette hypothèse, rappelons que nous avons observé de véritables remises en suspension des sédiments côtiers après de fortes bises.

2^o *Des coulées lentes par déséquilibre mécanique*

En dehors du remaniement brusque des sédiments côtiers par les courants, il convient de mentionner la possibilité d'un lent transport de ces dépôts vers les grands fonds: il suffit pour cela qu'une couche de sédiments se trouve en déséquilibre mécanique par suite de l'effet combiné de l'épaisseur de la couche et de la valeur de la pente. Les figures en pagodes, enregistrées au sondeur de vase pourraient bien représenter le début de ce processus.

3^o *Un abaissement du niveau du Léman*

Ce niveau fut pendant une partie des temps postglaciaires plus bas qu'aujourd'hui. Cette hypothèse a déjà été envisagée par P. VILLARET et M. BURRI (1965) pour expliquer, dans la coupe de Vidy, une lacune du Boréal et de l'Atlantique et par nous-mêmes (C. SERRUYA, J. SAUVAGE 1966) pour rendre compte d'une lacune dans les régions côtières à partir du Préboréal.

Dans cette perspective, la succession des faits serait la suivante:

au Dryas, le lac était à un niveau 30 ou 40 m supérieur à l'actuel (terrasse supérieure)

le niveau du lac aurait ensuite graduellement baissé jusqu'à la fin de l'Atlantique où il aurait été alors plus bas qu'aujourd'hui à partir du Subboréal ou plutôt du Subatlantique l'eau remonte et les sédiments remplissent les creux de la topographie.

En admettant que le niveau soit descendu nettement au-dessous du niveau actuel, nous pourrions ainsi rendre compte des lacunes que nous constatons dans les carottes côtières.

a) *Objections*

Cette hypothèse soulève quelques difficultés:

dans le cas d'une transgression subboréale ou subatlantique pourquoi ne trouve-t-on jamais de sédiments sub-boréal-subatlantique vers les côtes ? Il faudrait admettre que la remontée des eaux a été très lente et que le niveau actuel est très récent ? Mais pourquoi trouve-t-on du Subboréal à Vidy ? Il faut alors considérer les graviers subboréals de Vidy comme un apport fluviatile local,

dans les sédiments des carottes côtières nous n'avons jamais observé de traces d'émergence. Cette dernière objection n'a cependant pas une valeur absolue: J.J.H.C. Houbolt, ingénieur géologue à la Shell, nous a signalé oralement qu'il n'avait trouvé aucune trace d'émergence dans des sédiments qui avaient effectivement été exondés temporairement.

les stations palafittiques du Bronze se trouvent à des cotes comprises entre Z L — 1 et Z L — 2 soit + 368,5 à + 369,5 m c'est-à-dire 3 à 4 m sous le niveau actuel du lac. En admettant que la transgression subboréale ait amené le lac au niveau actuel, ces stations du Bronze, qu'elles soient palustres ou lacustres n'auraient guère pu être assez surélevées pour éviter les plus hautes eaux du Léman. Il serait donc plus vraisemblable que la transgression ait eu lieu au Subatlantique qui correspond à la fin de l'âge du Bronze.

Il est intéressant de signaler qu'une situation identique existe dans le lac de Tanganyka où jusqu'à une profondeur de 150 m on n'a pas trouvé de sédimentation autochtone. A. CAPART avait en 1949 interprété cette particularité comme une indication d'un niveau plus bas du lac. D.A. LIVINGSTONE, 1965, conteste cette interprétation d'après l'examen de carottages récemment effectués. Il s'étonne en particulier que depuis la découverte du lac Tanganyka qui remonte à plus d'un siècle, "a measurable amount of sediment has not been collected in the depths of less than 150 m".

C. *Vitesse de Sédimentation*

La notion de vitesse de sédimentation est une des plus imprécises qui soient. Ce terme est souvent employé comme un paramètre caractérisant l'ensemble d'un

bassin sédimentaire; or, il est très variable suivant les zones du bassin. Par ailleurs, lorsqu'elle est exprimée en unité de longueur par unité de temps, le volume d'eau associé au sédiment, variable d'après la colonne sédimentaire considérée, est compté comme du sédiment. Il faut noter que cette eau associée au sédiment ne l'est souvent que pendant une période transitoire.

Il est donc préférable à notre avis de parler de quantité de sédiments en poids sec par unité de temps. Cependant nous verrons que, dans certaines carottes, le sédiment conserve sur plusieurs mètres une teneur en eau très élevée et à peu près constante. Dans ce cas, l'eau est liée au sédiment d'une manière assez solide pour que le poids des couches sédimentaires supérieures ne provoque aucune compaction notable.

Il résulte de tout cela que la vitesse de sédimentation doit être exprimée différemment selon le but poursuivi. Pour comparer les dépôts annuels d'un lac avec l'érosion se produisant dans le bassin versant, nous devrons exprimer la vitesse de sédimentation en mg/an¹; mais pour examiner le volume du lac rempli par les dépôts annuels nous l'exprimerons en mm/an. La meilleure solution est sans doute d'accompagner chaque valeur de vitesse de sédimentation d'une indication de la teneur en eau ou bien de donner les résultats à la fois en mg/an et en mm/an.

Dans le lac Léman, nous obtenons les valeurs suivantes:

Subboréal-Subatlantique: 1 mm par an ou 65 mg/an/cm² en prenant une densité moyenne du sédiment frais de 1,37 et une teneur en eau moyenne de 110% (valeurs expérimentales);

Atlantique: 0,62 mm par an

48 mg/an/cm² ($d = 1,48$ teneur en eau = 90%);

Boréal: 0,91 mm par an

90 mg/an/cm² ($d = 1,60$ teneur en eau = 70%).

Ces valeurs sont correctes pour des zones de 100 m de fond dans la région occidentale du Grand-Lac. Les vitesses de sédimentation seraient beaucoup plus grandes au large d'Evian par exemple. Nous avons d'ailleurs vu dans la carotte L 45 l'épaisseur importante du Préboréal.

Les résultats précédents nous montrent que la sédimentation fut moins intense à l'Atlantique malgré l'humidité qui caractérise cette période. Cette vitesse de sédimentation moins élevée est peut-être à mettre en rapport avec le développement de la forêt par suite du réchauffement. On constate en effet une augmentation très importante de la fréquence pollinique et il n'est pas impossible que cette luxuriante végétation ait diminué l'érosion malgré l'augmentation de l'humidité. Par ailleurs, si les épaisseurs annuelles du Subboréal-Subatlantique et celles du Boréal sont très voisines, les valeurs pondérales annuelles sont bien plus grandes au Boréal. Autre-

¹ Poids en matière sèche du dépôt annuel sur une section de 1 cm²

ment dit la sédimentation fut plus active au Boréal qu'aux époques postérieures. Cette vitesse de sédimentation est élevée mais peut s'expliquer par la grande quantité de sédiments meubles ou peu résistants et par les pentes souvent importantes du bassin versant.

Une confirmation de ces valeurs a été fournie par la datation, par la méthode C¹⁴ d'un fragment de bois provenant du niveau 395 cm de la carotte L 66. L'âge déterminé par M^{me} G. DELIBRIAS du Laboratoire des Faibles Radioactivités de Gif-sur-Yvette a été de 3910 ans \pm 400 ans. Si nous prenons une valeur de 3900 ans, nous obtenons une vitesse de sédimentation de 1 mm par an.

D. *Périodicités enregistrées dans les varves*

Nous avons déjà exposé que certaines périodes du post-glaciaire se caractérisaient par des varves nombreuses, et d'autres, par l'absence totale de varves: en gros on peut estimer que les premières varves apparaissent au Boréal, dominent à l'Atlantique, et régressent ensuite. Elles se forment donc préférentiellement dans les sédiments déposés en période chaude.

Lorsqu'on ouvre une carotte du Léman, on voit aussitôt se dessiner, dans les zones varvées, des groupes de varves se répétant à intervalles assez réguliers. Pour chaque carotte varvée, nous avons dès l'ouverture, dessiné en grandeur nature toutes les microcouches avec leur épaisseur et leur teinte. Pour préciser cette observation sur la répétition régulière des groupes de varves, nous avons reporté sur papier millimétré l'épaisseur des laminæ noires en fonction du temps. Sur l'échelle des temps, une année a été représentée par 1 mm, valeur moyenne de la vitesse de sédimentation (fig. 19).

Période boréale: les couches noires sont peu épaisses et peu marquées. Une périodicité comprise entre 100 et 150 ans semble régir l'apparition de couches noires un peu plus épaisses mais le phénomène est peu net.

Période atlantique: là les couches noires sont nombreuses, très accentuées et plus épaisses. Une périodicité de 200 ans environ est parfaitement nette: des conditions probablement d'ordre climatique se répétant tous les deux siècles ont favorisé la formation de couches noires particulièrement épaisses. D'autres périodicités d'ordre inférieur peuvent être décelées par exemple de 30 ans et de 50 ans.

Ces couches renfermant des groupes de varves et correspondant environ à 200 ans seraient assimilables aux « stratifications de 3^e ordre » de R.Y. ANDERSON et R.Y. ANDERSON et al. (1963, 1964, 1966). Ces auteurs en ont observé de semblables et pensent que ce type de périodicité peut correspondre à celle des taches solaires. SHOSTAKOVICH 1931, 1944, compara l'épaisseur des varves récentes de certains lacs russes avec la courbe d'intensité des taches solaires les varves épaisses correspondraient aux maxima de l'activité solaire.

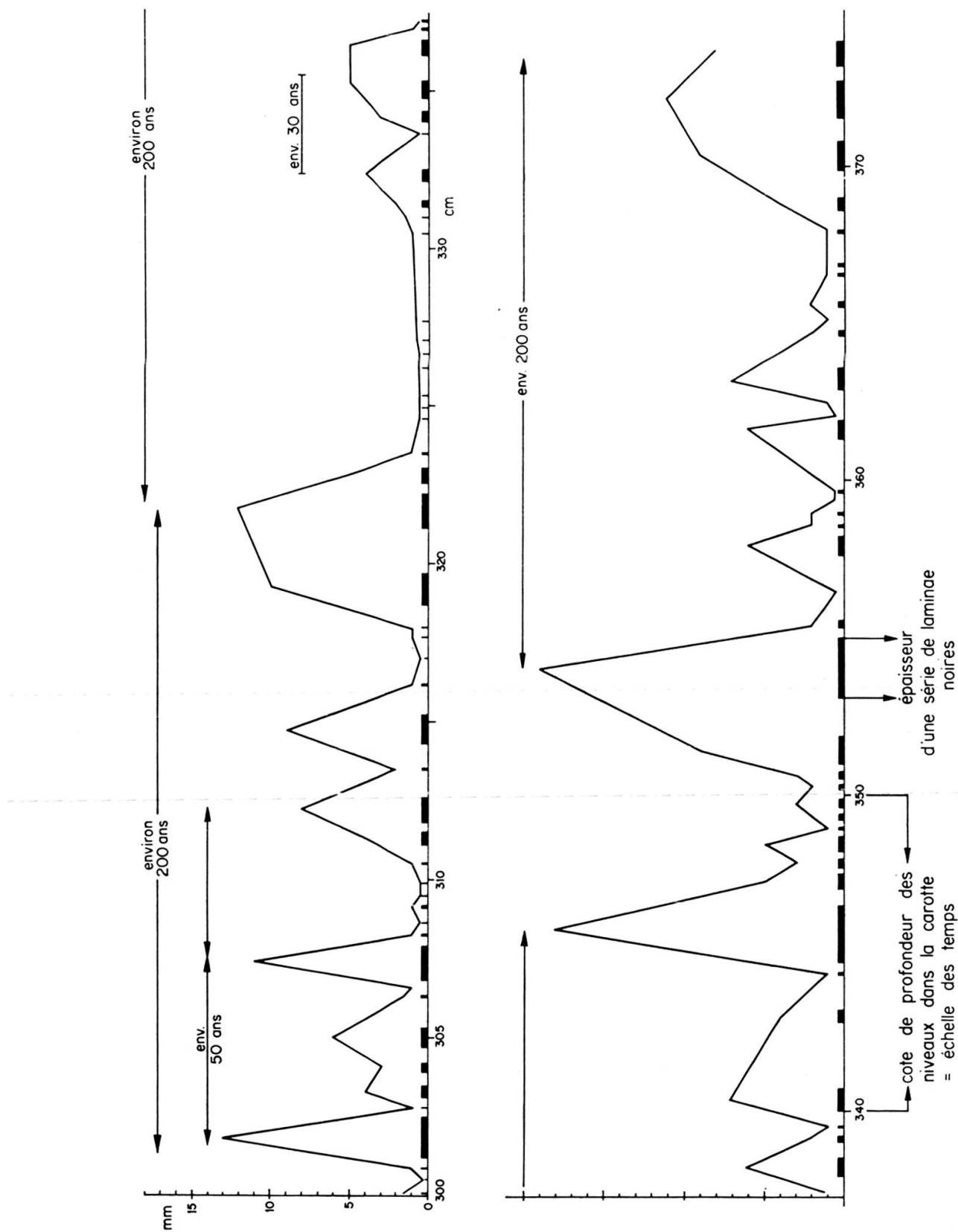


FIG. 19. — Périodicités enregistrées dans les varves. Période Atlantique, Carotte L 52 (70 m de fond au large de Thonon).

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^o *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. CZECHUGA (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 notamment 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^o *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 Lausanne	Juillet 64 m Thonon	Juillet 100 m Thonon	Juillet 101 m Lausanne	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							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 miciokjeldahl 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).

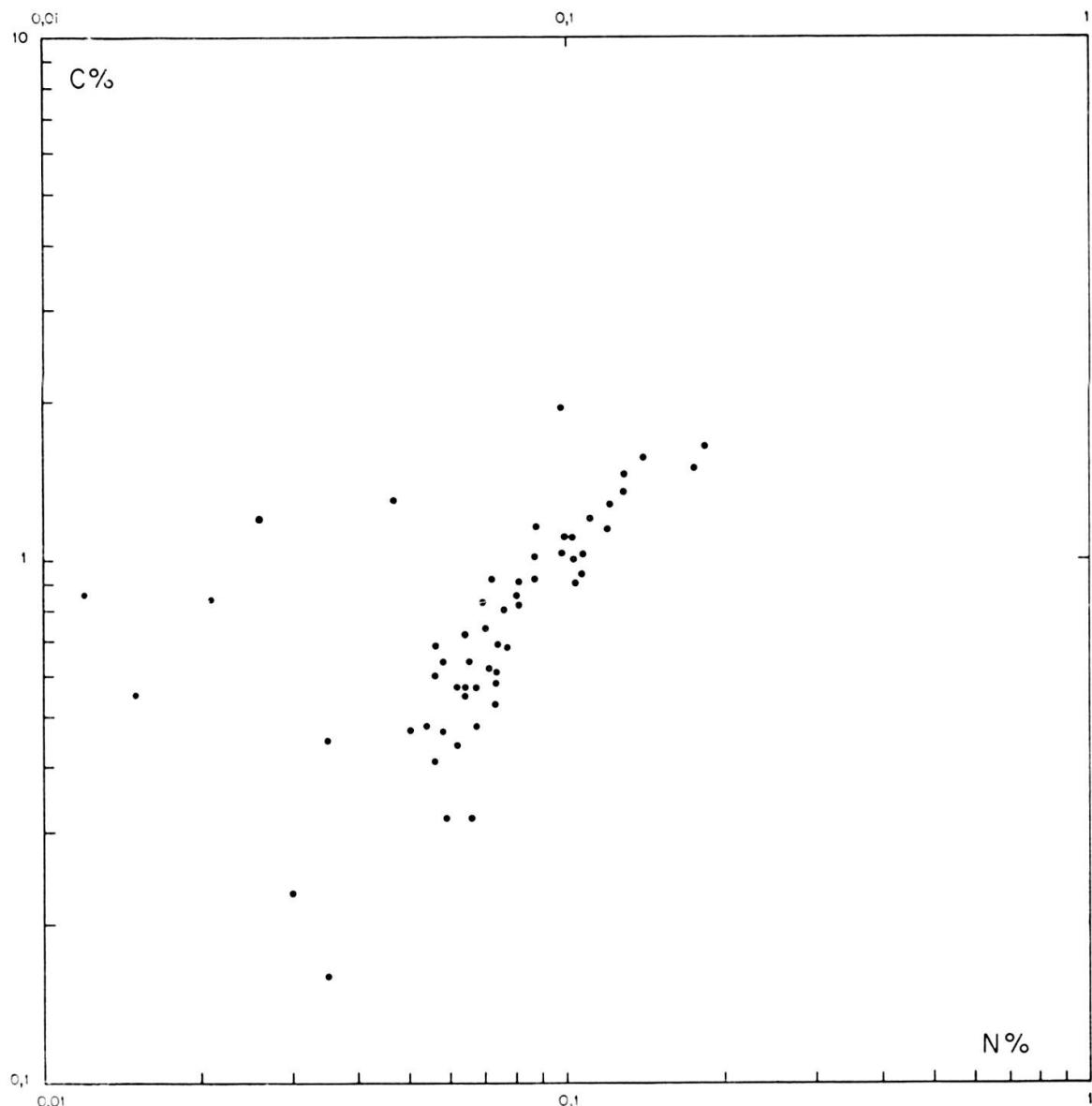


FIG. 20 — Corrélation entre le Carbone organique et l'Azote des sédiments.

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 génèse 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. Les ensemencements 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^o le nombre total de bactéries en surface est plus grand dans les régions côtières que par 100 m de fond,
- 2^o 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^o 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,

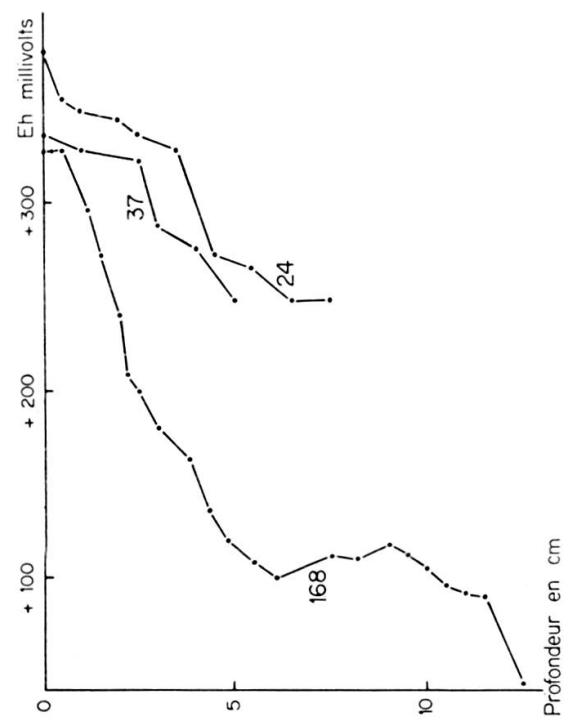
si dans ce complexe existent bien des ions à valence variable tels que Fe, Mn, Cr..., ils sont loin de figurer à l'état d'ions simples comme dans une solution d'électrolyte diluée. On sait en particulier que ces métaux entrent en combinaisons encore assez mal définies avec des matières organiques et 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 prélevements

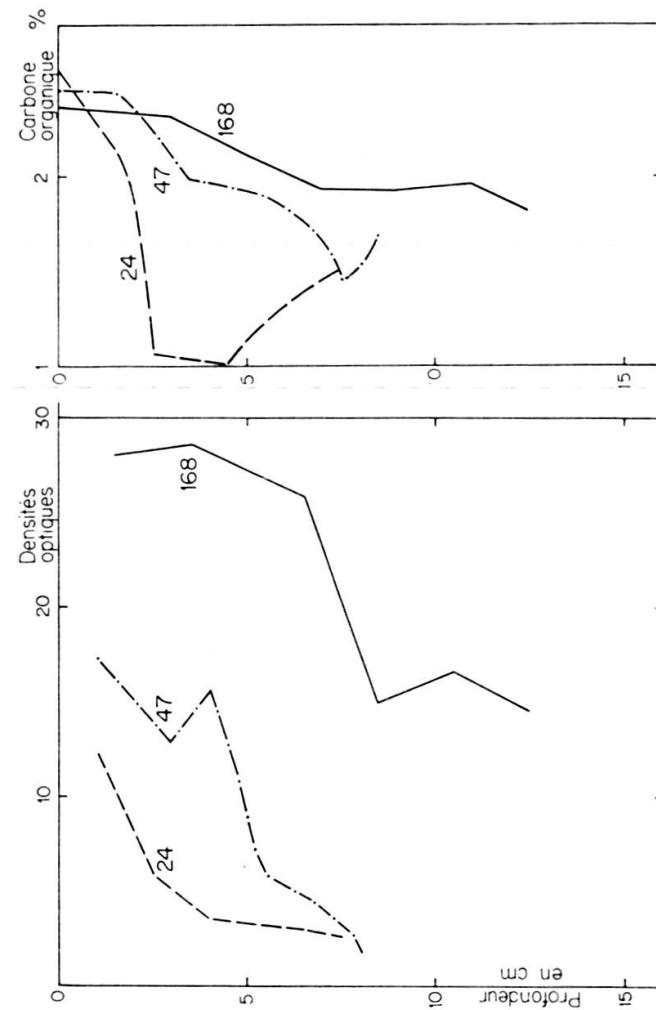
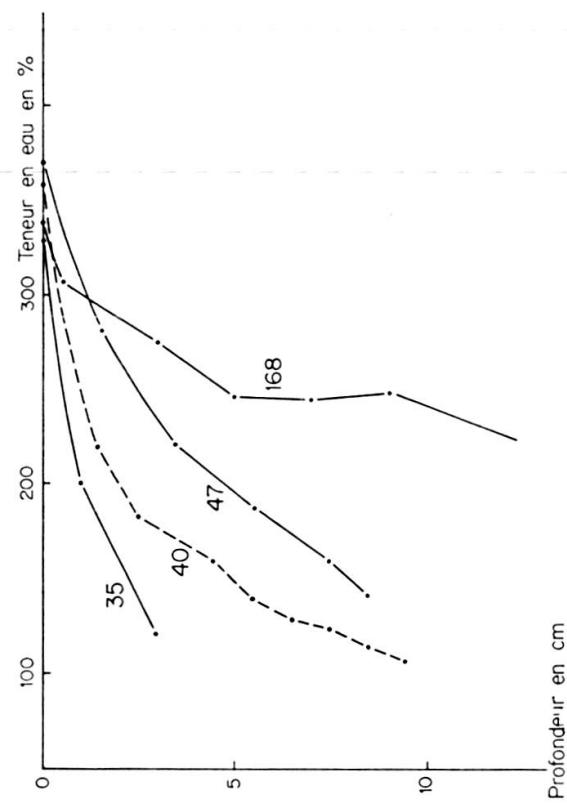


Fig. 21. — Teneur en eau, potentiel redox, densité optique des sédiments en fonction de la bathymétrie. Les nombres figurant sur les courbes indiquent la profondeur des prélevements.

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^o *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 CO₂ 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 CO₂ 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 sulfurié 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 CO₂ 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^o *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 varvée 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^o *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. (TOURTELLOT)	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^o 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. TOURTELLOT (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 TOURTELLOT 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 TOURTELLOT 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 TOURTELLOT 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^o 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^o 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 TOURTELLOT 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^o 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 échantillonage 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 marins étudiés par TOURTELLOT 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^o *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-Glaciale.

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-</i> <i>Subatlantique-</i> <i>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 continual 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^e *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.

CINQUIÈME PARTIE

QUELQUES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SÉDIMENTS

CHAPITRE PREMIER

TENEUR EN EAU

La teneur en eau de presque toutes les carottes a été mesurée dès l'ouverture de la chemise plastique qui les contenait. Les mesures concernant certaines d'entre elles ont été écartées en raison d'un traitement inadéquat, par exemple exposition prolongée de la carotte à une température élevée qui aurait pu entraîner une évaporation à travers le plastique. Les valeurs qui figurent dans les profils des Fig. n° 8 à 17 sont donc parfaitement comparables entre elles. Les mesures ont été faites par la méthode pondérale.

A. Résultat global

Les teneurs en eau mesurées dans les carottes du Léman varient dans des limites considérables.

Les plus faibles teneurs en eau concernent les graviers, sables et vases sableuses des Dryas: 25 à 50% environ. Les valeurs les plus fortes constatées dans les carottes atteignent 200% dans les niveaux varvés (L 77) et dans ces mêmes niveaux d'autres carottes, les valeurs de 120 à 150% ne sont pas rares.

Une mention spéciale doit être faite de la couche tout à fait supérieure des vases actuelles. Prélevées avec l'appareil Mortimer-Jenkins, elles révèlent des teneurs en eau de 200 à 350%. Il s'agit plus d'une suspension que d'un sédiment.

Les observations précédentes ont des conséquences importantes:

1^o Durée de la sédimentation

Il doit falloir un temps assez considérable à la suspension vaseuse pour se déposer définitivement puisque le moindre courant ou le déplacement d'un poisson suffit à la remettre en mouvement. Ces reprises successives, surtout dans les zones de faible bathymétrie où les courants sont les plus efficaces, interviennent beaucoup dans l'oxydation des vases côtières qui se redéposent sur place. En particulier si ces reprises n'avaient pas lieu, seule une mince pellicule de quelques millimètres serait oxydée. Il y a donc par ce mécanisme, augmentation de la hauteur de la zone oxydée et plus intense dégradation à l'intérieur de celle-ci des substances réductrices.

2^o *Mise en mouvement des dépôts*

L'énergie mécanique nécessaire au décollement des couches de vase superficielles et à son entraînement vers les grands fonds est très faible. La question des importantes accumulations de sédiments au large de Meillerie par exemple s'en trouve singulièrement éclairée.

3^o *Comparaison avec la teneur en eau des vases marines*

Les sédiments marins superficiels ont des teneurs en eau plus faibles: nous croyons qu'il faut en rechercher la cause dans la concentration beaucoup plus grande en électrolytes.

T. W. LAMBE (1958) a supposé que, dans l'eau douce, les paillettes argileuses s'assemblent de la manière suivante: les bords des paillettes viennent buter à angle droit contre les faces parallèles de leurs voisines. Par contre en milieu salé, les particules ont tendance à se déposer parallèlement les unes aux autres. Notons que l'hypothèse de T. W. LAMBE, issue de la théorie de la double couche de Goury-Chapman, a été vérifiée par des photos prises au microscope électronique. Il en résulte une disposition beaucoup plus lâche pour les sédiments fins d'eau douce que pour les sédiments marins. Cela expliquerait pourquoi les premiers ont des teneurs en eau plus faibles que les secondes.

E. SEIBOLT (1956) qui a étudié en détail les variations de teneur en eau des sédiments les plus divers conclut aussi qu'à granulométrie égale, les vases d'eau douce contiennent toujours plus d'eau que les vases marines.

La haute teneur en eau des vases superficielles du Léman est donc à relier à la très faible concentration électrolytique des eaux du lac.

Les facteurs qui interviennent pour rendre compte des variations de la teneur en eau à l'intérieur de la colonne sédimentaire sont nombreux et interdépendants. Nous essaierons de démêler ces interactions en exposant les relations que nous avons trouvées entre la teneur en eau et certains paramètres bien définis.

B. *La teneur en eau et la granulométrie*

C'est un fait d'expérience relaté par d'innombrables auteurs que les formations sableuses ont des teneurs en eau beaucoup plus faibles que les formations fines. Les sédiments lémaniques ne font pas exception: quel que soit l'âge des dépôts, on observe une chute de teneur en eau à chaque passée sableuse.

C. *La teneur en eau et le pouvoir réducteur (matière organique)*

Le parallélisme qu'on peut noter sur les profils entre les courbes de teneur en eau et les courbes de pouvoir réducteur est évident. Cette corrélation stricte explique que dans certaines carottes, la teneur en eau est plus importante à un mètre

sous la surface qu'à la surface elle-même (L 59, L 69, L 80, L 56 etc...). Cela tient au fait que la teneur en Carbone est plus grande à cette profondeur qu'à la surface. Comme nous l'avons vu, la productivité fut plus importante à l'Atlantique et au Subboréal qu'aujourd'hui.

La figure n° 22 montre que la relation entre le carbone et l'eau est de type logarithmique.

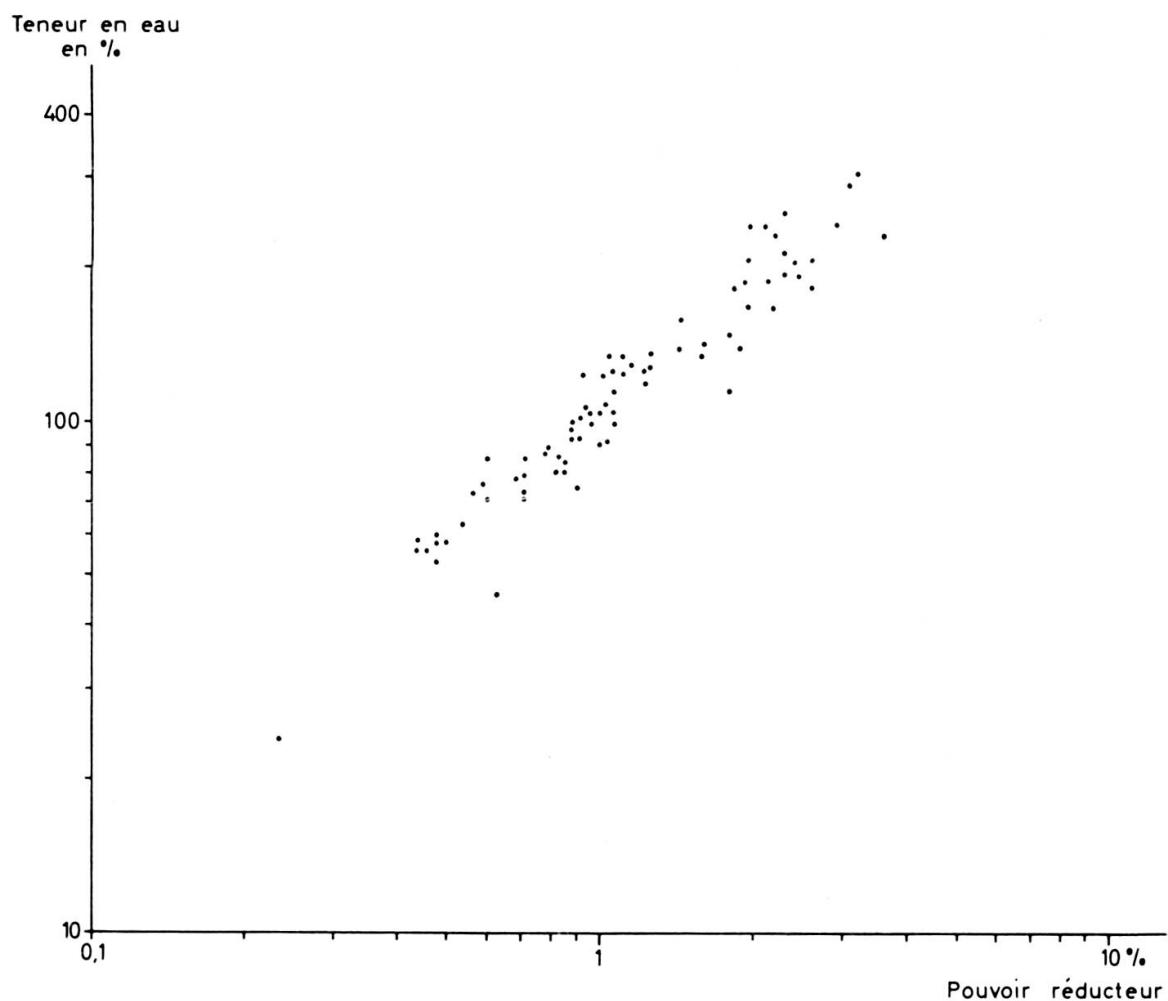


FIG. 22. — Corrélation entre la teneur en eau et le pouvoir réducteur des sédiments.

De telles relations entre la teneur en matière organique et la teneur en eau ont été signalées très fréquemment (P. D. TRASK, 1932 etc...) mais n'ont pas reçu, semble-t-il, d'explication satisfaisante. Une question fondamentale est de savoir si cette relation est primaire — l'augmentation de la teneur en eau est liée à une propriété de la matière organique elle-même — ou secondaire — la teneur en matière organique et la teneur en eau dépendent d'un troisième et même facteur et ont des variations simultanées. T. I. GORSHKOVA (1956) penche pour cette deuxième hypothèse. Cet auteur remarque en effet un rapport entre la teneur en matière organique

et la teneur du sédiment en éléments fins. Or ceux-ci sont, nous l'avons vu, toujours plus riches en eau que les sédiments grossiers. Le dépôt de la matière organique exigerait des conditions hydrodynamiques voisines de celui des sédiments fins et c'est par ce biais que ces deux paramètres montreraient une variation concomitante.

1^o *Le rapport $\frac{eau}{carbone}$*

Regardons quelle est la variation de ce rapport en fonction de la profondeur. La figure n° 23 montre que dans certaines carottes cette variation est fonction de la

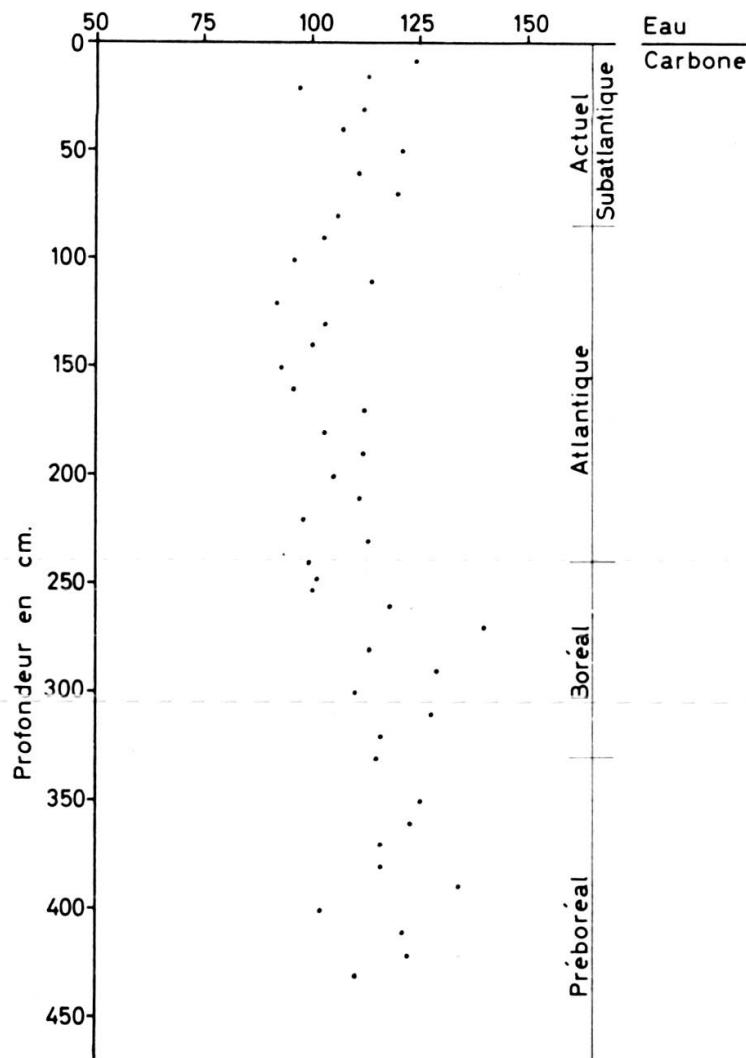


FIG. 23. — Évolution du rapport teneur en eau/carbone organique avec la profondeur.
Carotte L 51 (80 m de fond au large de Corzent)

profondeur des niveaux considérés, ce qui peut correspondre à l'âge du sédiment ou à sa teneur en eau. Si la liaison de l'eau et du carbone était constante dans le sédiment, nos courbes devraient être parallèles aux abscisses. Dans la carotte L 69

(150 m de fond) qui traverse le Subboréal-Subatlantique jusqu'à 170 cm et reste ensuite dans l'Atlantique, le rapport eau/carbone organique décroît avec la profondeur.

Une quantité donnée de matière organique retient donc de moins en moins d'eau à mesure que le sédiment vieillit. Cependant la variation du rapport eau/carbone organique dans la carotte L 51 (80 m de fond) qui traverse presque tout le Post-glaciaire montre que si le rapport décroît jusqu'à la montée de la période atlantique, tout comme dans L 69, il remonte ensuite très nettement au Boréal et au Préboréal. Ces variations ne pourront s'interpréter correctement que lorsqu'on déterminera avec précision les éléments constitutifs de la matière organique. En effet, il est possible qu'à certaines époques se soient déposées des matières organiques plus hydrophiles ou que leur décomposition n'ait pas donné à travers le Post-glaciaire des produits identiques.

2^o *Rôle des oxydations dans le départ de l'eau*

L'énergie de liaison des groupements organiques avec l'argile est très variable: la destruction par oxydation du composé organique sera en quelque sorte un bilan positif entre le potentiel du facteur oxydant et l'énergie qui l'attache à l'argile. Les expériences de J.R. VALLENTYNE (1963) semblent montrer que cette énergie de liaison est parfois considérable. C'est donc dans un milieu très oxydant à intense activité bactérienne que les complexes organo-argileux pourront être dissociés et cette dissociation s'accompagnera toujours d'un important départ d'eau.

La quantité de matière organique complexée dépend évidemment de la teneur en argile du sédiment, les autres minéraux n'ayant pas le même comportement. Mais de toutes façons, les matières organiques et leurs produits de dégradation souvent très hygrophiles joueront le rôle de coussins inter-minéraux. Ce caractère, joint au foisonnement des argiles en milieu peu salé, explique les teneurs en eau très élevées trouvées dans certaines carottes.

Si le dépôt a lieu dans un milieu assez oxydant pour vaincre les énergies des complexes on verra alors se produire la chaîne de réactions suivantes:

dissociation des complexes et départ de l'eau de constitution de ceux-ci
départ de l'eau de solvation des molécules organiques polaires
disparition des coussins interminéraux et de leur eau liée
enfin toute oxydation d'une molécule organique s'accomplice avec un départ d'eau.

N'oublions pas que l'oxydation totale d'une molécule de glucose donne 6 molécules d'eau.

Si la diagénèse précoce peut se définir comme un départ d'eau et un tasement, l'oxydation est un inducteur de diagénèse.

3^o *Sédimentation expérimentale*

Nous avons essayé d'étudier expérimentalement les relations entre le potentiel oxydant du milieu et la teneur en eau du sédiment.

a) *Matériel et conditions expérimentales*

Une cuve de verre de 50 litres construite par assemblage de plaques de verre avec de l'araldite fut remplie d'eau du lac. Un cristallisoir jouait le rôle du réservoir sédimentaire. La vase qui y fut placée provenait de la pellicule la plus superficielle des dépôts noirs du port du C.R.G. Nous avons provoqué dans la cuve une sédimentation régulière de particules fines pour éviter la formation de flocons qui tombent sur le fond avec des vitesses anormalement grandes.

Des électrodes spéciales, électrodes-cannes, construites pour ce type d'expérience (70 cm de long, 3 mm de diamètre) et montées sur crémaillères permettaient de contrôler à tous moments le Eh et le pH du milieu eau et vase.

b) *Observations et mesures*

Dans la cuve, un barboteur d'air de type aquarium fut placé et réglé à un débit assez faible pour ne pas créer de remous trop importants. Les taux de saturation en oxygène du milieu furent mesurés trois à quatre fois par jour.

Peu après la mise en marche du système, on constate que, malgré le barbotage incessant d'air, le taux de saturation en oxygène ne cesse de baisser et atteint 80%. La température de l'eau oscille autour de 16,8°C. Le pH est voisin de 8,0 et le Eh de + 460 mV. La vase qui se dépose est très noire et à son contact le Eh n'est que de + 100 mV. Au bout de 3 jours, on ajoute un second aérateur dans la cuve et le taux de saturation de l'oxygène reste stable vers 93%. Comme on a également réduit le rythme de la sédimentation, la vase qui se dépose est grise. Par transparence à travers la paroi de verre, on voit distinctement 2 micro-couches: la lamina inférieure très noire (couche A) est recouverte par une autre grise (couche B).

Le système des aérateurs est insuffisant pour recréer des conditions de sursaturation en oxygène identiques à celles qu'on trouve en surface dans le lac. Nous décidons donc d'ajouter un peu d'eau oxygénée. Quatre jours après le début de l'expérience, 10 cc de O_2H_2 à 110 volumes préalablement dilués dans 2 litres d'eau du lac sont versés dans la cuve. Les taux de saturation atteignent alors 200%. Les plus fortes sursaturations mesurées en surface dans le Léman ont été de 131% et dans le lac de Nantua de 200%. Le pH est de 8,8 et le potentiel d'oxydo-réduction est très variable. La vase qui se dépose dans ces conditions est gris très clair (couche C).

Après 10 jours de sédimentation dans ces nouvelles conditions, on constate que la couche B grise lors de son dépôt devient de plus en plus noire. Après 26 jours la couche B est entièrement noire et se distingue difficilement de la couche A. La couche C a augmenté d'épaisseur mais on ne constate pas, même à sa base, d'évolution

dans sa couleur. Après 40 jours d'expérience, la sédimentation est arrêtée, l'aérateur continuant à fonctionner et le système est laissé au repos.

Au bout de 2 mois, on ne distinguait plus la couche B de la couche A, mais la couche C était toujours de couleur claire. On fit alors un échantillonnage de sédiment dans la couche C d'une part et dans les couches A et B de l'autre. On obtint:

	Carbone organique	Teneur en eau
Couche A + B	2,8%	180%
Couche C	0,9%	90%

Cette expérience montre que:

- 1^o Seul un milieu nettement oxydant peut donner au sédiment un faciès clair et compact durable. Dans le milieu naturel ces conditions sont atteintes bien en dessous d'un taux de saturation d'oxygène de 200% par suite du brassage permanent des particules dans l'eau,
- 2^o Un milieu moyennement oxydant suffit pour oxyder temporairement les sels de fer mais dès qu'une couche supplémentaire vient isoler ce dépôt, les processus réducteurs jouent de nouveau. Etant en grande partie d'origine bactérienne, ces processus sont favorisés par des teneurs encore élevées de matière organique. Il n'en va plus de même lorsqu'un milieu plus oxydant a détruit la plus grande partie de celle-ci. Les processus réducteurs sont alors inhibés ou très ralentis.

Le programme initial d'expérience prévoyait la mesure sur chaque type de sédiment des éléments traces, mais l'expérience a été interrompue avant que ces mesures pussent être effectuées.

c) *Conclusions*

Ces expériences montrent que l'oxydation favorise, par élimination de l'eau et des matières organiques, un rapprochement des particules qui développent alors des liaisons solide-solide durables. Une étude détaillée de la diagénèse précoce (early diagenesis des anglo-saxons) devra s'orienter dans 3 directions:

recherche concernant les produits intermédiaires de dégradation des matières organiques,

recherches plus approfondies des phénomènes se produisant à la surface des argiles et des corps finement divisés,

recherche quantitative par la thermodynamique en ce qui concerne les énergies de liaison organo-minérales. On saura alors quelle énergie chimique (oxydation de la matière organique) ou quelle énergie mécanique (pression des couches sus-jacentes) sera nécessaire pour obtenir un certain tassement.

D. *La teneur en eau et l'âge des sédiments*

Du fait qu'en général les sédiments plus anciens se trouvent également à la base de séries dont ils supportent la pression, on peut confondre l'effet sur la teneur en eau des 2 paramètres: l'âge du sédiment et son tassement par pression. Or dans le Léman, nous pouvons justement séparer ces deux influences puisque des sédiments du Préboréal affleurent sous l'eau et qu'il est peu probable qu'ils aient jamais supporté des sédiments plus récents.

La carotte L 45 par exemple, où affleure du Préboréal formé de sédiments fins et légèrement varvés, présente des teneurs en eau oscillant autour de 75% et un pouvoir réducteur compris entre 0,5 et 0,7%.

Cependant le problème de savoir quelle est exactement l'influence du temps seul — sur le vieillissement des colloïdes par exemple — n'en est pas résolu pour autant. En effet, dans le cas de la carotte L 45, on peut toujours se demander si les valeurs actuelles du Carbone et de l'eau proviennent:

d'une teneur en carbone originellement élevée puis réduite par la suite sous l'influence de facteurs oxydants,

ou d'une teneur en eau et en Carbone faibles au départ et ayant subi peu de modifications par la suite.

Il existe beaucoup d'exemples dans la littérature concernant les faibles teneurs en eau de formations anciennes affleurantes: S.V. BRUEVICH (1945) trouva au fond de la Caspienne des formations argileuses à 43% d'humidité alors que les vases environnantes avaient une teneur en eau moyenne de 136%. Il put les relier à des formations pliocènes. T.H. Van ANDEL et K.H. POSTMA (1954) trouvèrent également dans le golfe de Paria des formations à teneur en eau « anormalement » basse et montrèrent qu'il s'agissait aussi de formations pliocènes. Mais là encore, l'ignorance où nous sommes des conditions de dépôt, nous empêche de donner une interprétation sûre.

Reprendons l'exemple de la carotte L 45: ce que nous savons de la flore du Préboréal nous permet de conclure à un climat froid et donc à un milieu lacustre oxydant par suite de stratifications thermiques peu stables et peu durables mais ne nous autorise pas à conclure à une moindre productivité: on sait en effet qu'actuellement la productivité est très importante dans les mers arctiques. D'ailleurs certains niveaux du Préboréal (L23) sont riches en carbone organique et en eau. Le Préboréal correspondait à un milieu assez riche en matière organique mais où les conditions très oxydantes s'opposaient à sa préservation. Le mauvais état de conservation des pollens est un argument en faveur d'un tel milieu.

On voit donc, qu'au moins en ce qui concerne le Post-Glaciaire, les modifications après le dépôt doivent être moins importantes que celles qui ont lieu pendant le

dépôt. *Le faciès du sédiment et son évolution ultérieure seraient induits au moment même du dépôt. Si l'eau est rejetée lors du dépôt, les liaisons interminérales se développent. Sinon l'eau sera fossilisée.*

E. *La teneur en eau et la pression des sédiments sus-jacents*

Dans les colonnes de sédiments étudiées dont la hauteur maximum a été de 8 mètres, on ne peut pas trouver de diminution de la teneur en eau qui soit dûe à la seule pression. En effet pour étudier cette question d'une manière valable, il faut éliminer l'influence des variations climatiques et celle du pouvoir réducteur on est donc réduit à considérer des tranches sédimentaires appartenant à une même période.

Un bon exemple nous est fourni par la L 69 au large d'Evian, entièrement située dans le Subboréal-subatlantique. La valeur du pouvoir réducteur est très stable, aux alentours de 1,2%, la teneur en eau reste voisine de 100% pendant près de 4 m. De 4 à 5 m, l'humidité s'abaisse à 70% mais le pouvoir réducteur subit également un léger déclin. Une épaisseur de 4 m de sédiments de densité moyenne 1,5 ne produit aucun tassement appréciable.

Des résultats analogues figurent dans la littérature. E. SEIBOLD (1956) note que si au début de la diagénèse le dépôt perd une grande partie de son eau, ensuite pendant un long intervalle, sa teneur en eau change peu.

Les variations d'humidité des sédiments postglaciaires dépendent donc beaucoup plus des quantités plus ou moins grandes d'argiles et de matières organiques que de la pression. Il existe probablement une valeur-seuil au-dessous de laquelle la pression exercée par les sédiments sous l'eau n'est pas efficace dans le tassement des vases.

F. *La teneur en eau et la vitesse de sédimentation*

Nous avons plusieurs fois signalé que les sédiments situés à l'Est de la ligne Amphion-Morges étaient plus épais. Ils sont souvent aussi plus riches en carbone et en eau que les sédiments de la partie occidentale. C'est sur la transversale Evian-Lausanne que nous avons trouvé de nombreux fragments de bois à peine dégradés.

Ces propriétés s'expliquent par les vitesses de sédimentation élevées dans la zone orientale du lac. Etant donné le caractère syngénétique et lié à l'oxydation du tassement primaire, ce processus se déroulera d'autant plus complètement que la couche qui se dépose restera plus longtemps en contact avec les facteurs oxydants. Le départ d'eau contemporain du dépôt est donc fonction inverse de la vitesse de sédimentation. Lorsque ce paramètre atteint des valeurs élevées, ce qui est le cas pour la zone subsidente de l'Est du lac, la matière organique ne se transforme pas, mais est enfouie avec l'eau qui lui est liée: la matière organique comme l'eau est fossilisée.

Conclusion

Dans l'ensemble du lac Léman, règne une assez grande homogénéité dans la composition minéralogique, chimique et granulométrique des sédiments; les conditions générales du milieu sont de type oxydant. La vitesse de sédimentation est alors le principal facteur qui intervient pour régler les processus diagénétiques dans les différentes régions du lac.

- 1^o *Dans les zones à sédimentation lente*, les dégradations biochimiques contemporaines du dépôt sont importantes et rapides. Le sédiment est d'emblée appauvri en matières organiques et en eau et le tassement intervient aussitôt. C'est le cas de la partie occidentale du lac.
- 2^o *Dans les zones à sédimentation rapide*: le tassement syngénétique n'a pas lieu. La diagénèse est donc différenciée. L'expulsion d'eau n'aura lieu que lorsque la pression des sédiments sus-jacents aura dépassé en intensité les forces de liaison eau-matière organique-argile et nous avons vu que cela n'est pas atteint pour des colonnes de sédiments de 4 à 5 m. Tel est le cas de la partie du lac située à l'Est d'une ligne Amphion-Lausanne.

D'après les résultats de notre étude géophysique du tréfonds du lac, nous savons que la subsidence de la zone orientale du lac — cause directe des vitesses de sédimentation élevées — par rapport à une zone occidentale stable ou en légère surrection est dûe au phénomène tectonique des Préalpes et à la surpression isostasique qu'elles exercent. Il ressort de ces observations que les zones subsidentes se chargent de sédiments peu évolués et très riches en eau et que les zones stables ou en surrection sont le lieu de dépôt de sédiments subissant une évolution diagénétique importante. Dans chacune de ces deux zones, des sous-divisions apparaissent en fonction du degré de potentiel oxydant du milieu qui est en gros fonction de la bathymétrie.

La sédimentation dans le Léman est donc conditionnée essentiellement par des facteurs tectoniques: elle est en quelque sorte une réponse quaternaire et actuelle à un événement tectonique qui a débuté au Miocène.

CHAPITRE II

DENSITÉ

Lorsqu'on essaie de comprendre le mécanisme du tassement précoce d'un sédiment, les mesures les plus fines possibles de sa densité sont primordiales. Pour la plupart des carottes étudiées, nous avons effectué, sur le matériel frais, un certain

nombre de mesures de densité au pycnomètre. Sur une des carottes, la L 49, nous avons eu la possibilité de faire une mesure en continu au cours d'un stage effectué au Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble.

A. *La densité au pycnomètre*

La mesure consiste à évaluer le rapport du poids de l'échantillon au poids du volume d'eau qu'il déplace.

1^o *Variation de la densité avec la teneur en eau*

La figure n° 24 montre qu'il existe une corrélation très stricte entre la teneur en eau d'un échantillon étuvé 24 heures à 105°C exprimée par rapport au poids sec,

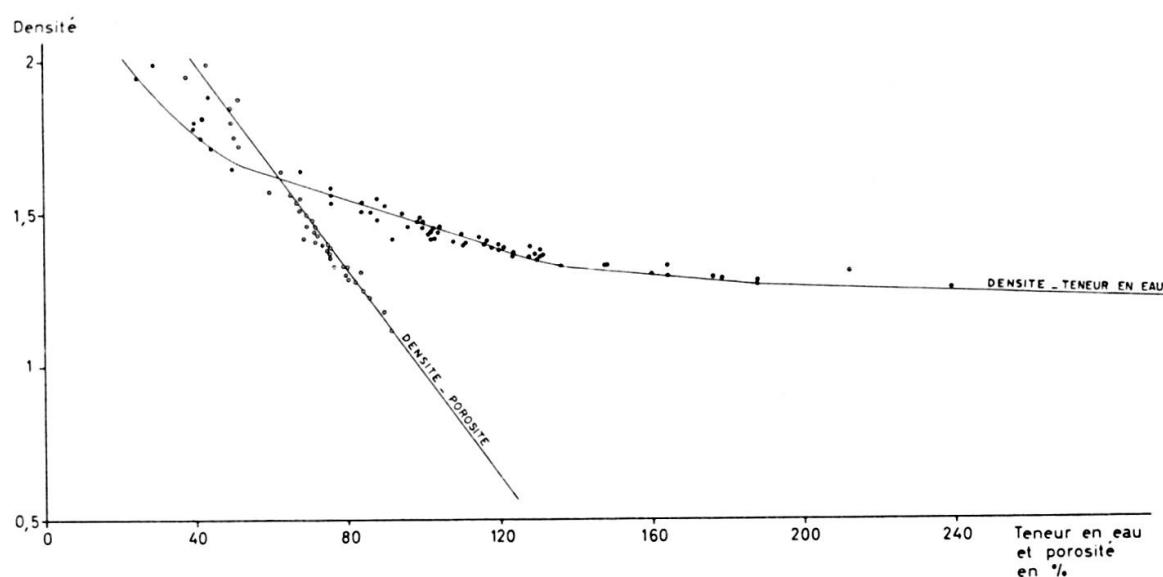


FIG. 24. — Variation de la densité du sédiment frais de la teneur en eau et de la porosité.

et la densité telle que nous l'avons déterminée au pycnomètre. Pour que nos résultats soient comparables avec des recherches analogues menées par d'autres auteurs anglo-saxons, nous avons construit la courbe des densités en fonction de la porosité.

La porosité P , est le rapport du volume des vides au volume total du sédiment. Par contre, la teneur en eau, m , telle que nous l'avons définie, est le rapport du poids d'eau, non au poids total du sédiment, mais au poids de sédiment sec. La relation entre P et m fait intervenir d , densité des particules solides, que nous avons pris égal à 2,5 d'après des mesures sur nos échantillons et s'écrit

$$P = \frac{m}{\frac{100}{d} + m} = \frac{md}{100 + md}$$

La figure n° 24 montre que la relation entre porosité et densité est linéaire. Une relation analogue a été obtenue pour les sédiments marins par E.L. HAMILTON

et H.W. MENARD (1956) et par A.F. RICHARDS (1962). La courbe obtenue pour les sédiments lémaniques est très voisine de celle de A.F. RICHARDS mais ne concorde pas avec celle de E.H. RATCLIFFE (1960). Il est probable, ainsi que le suppose A.F. RICHARDS, que cet auteur a traité des échantillons déjà désaturés.

2^o *Variation de la densité avec la profondeur*

Nous avons vu antérieurement que la teneur en eau avait tendance à décroître avec la profondeur et nous avons analysé les causes. Etant donné la relation précédente qui lie la teneur en eau et la densité, il est évident que celle-ci augmente en général avec la profondeur. Les plus fortes densités mesurées sont de 2,05 dans les vases sableuses du Petit Lac.

B. *Variation de la densité par absorption γ le long d'une carotte*

1^o *Principe de la méthode*

Les rayons γ sont des ondes électromagnétiques comme la lumière visible ou les rayons X mais contrairement à ceux-ci qui naissent de modifications dans les couches électroniques, les rayons γ proviennent de la désintégration des noyaux. La bande d'énergie des rayons γ varie de quelques Kev à plusieurs Mev.

Si un faisceau incident de rayons γ , I_0 , est dirigé sur de la matière on observe une certaine absorption. Le faisceau, après avoir traversé la matière absorbante, est dit « atténué », soit I . Cette atténuation dépend de l'énergie du rayon incident I_0 , de la nature de la matière traversée, en particulier de sa densité d et de son épaisseur x , et de son coefficient d'absorption μ . Elle s'exprime par l'équation exponentielle:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Les rayons γ étant fortement absorbés par les protons de l'eau, la méthode convient spécialement pour les mesures d'humidité et de densité. Les conditions de validité de l'équation sont:

un milieu homogène et une épaisseur faible
une émission énergétique dans une bande très étroite

Cette dernière condition est réalisée par un montage expérimental adéquat.

2^o *Montage expérimental*

a) *La source*

Le choix de la source dépend du matériel à étudier, de son épaisseur et de la durée d'observation.

Pour l'étude de la densité des carottes logées dans leurs chemises de plastique, le Cesium 137 convient assez bien. Sa période est de 27 ans et son pic énergétique principal est de 660 Kev.

b) *collimateurs*

Le faisceau est limité par deux collimateurs de section 1 mm \times 2 mm situés de chaque côté de l'échantillon. Un tel dispositif est utilisé pour éliminer le rayonnement Compton.

c) *Le détecteur*

Il comprend un photomultiplicateur surmonté d'un scintillateur I Na de 1,5 pouces \times 2 pouces, où les photons sont transformés en énergie électrique; les impulsions électriques sont ensuite envoyées vers l'enregistreur.

Le rayonnement γ qui arrive au détecteur est polyénergétique; or le type de montage réalisé permet, une fois fixé un seuil de discrimination, d'écartez toutes les radiations dont le niveau énergétique est situé au-dessus ou au-dessous du seuil.

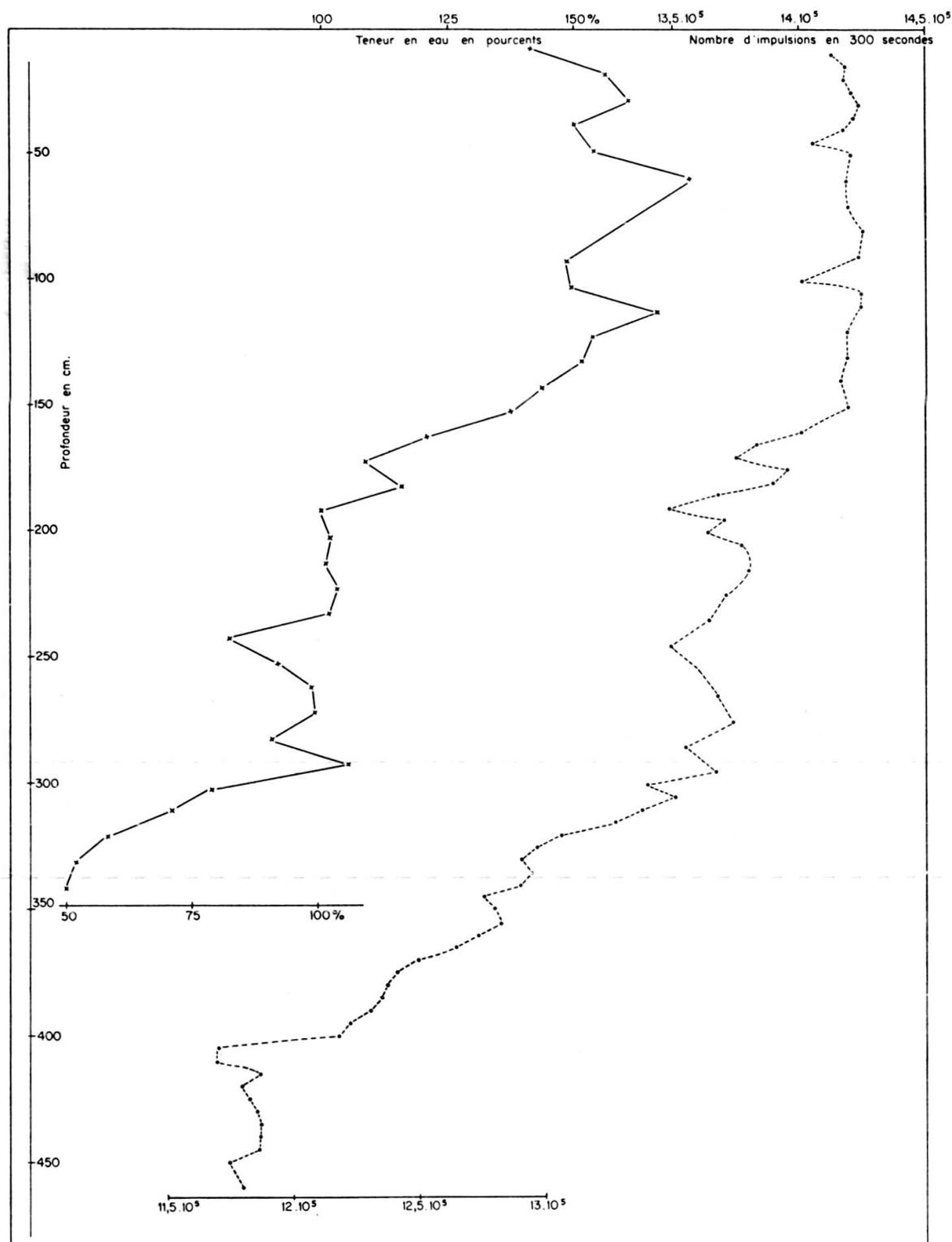
d) *La partie mécanique du montage*

Tous les éléments ont été fixés solidement sur des cornières métalliques « Dexion »; la carotte à examiner a été placée sur un chariot. Chaque déplacement de ce dernier fait avancer la carotte de 5 cm devant les collimateurs. Le tout a été ajusté de sorte que la ligne joignant le centre des collimateurs passe par le diamètre de la carotte.

3^o *Résultats*

La courbe de la figure 25 représente les variations de l'absorption par les sédiments de la carotte L 49 en fonction de la profondeur. Sur la même figure, on a reporté la courbe des teneurs en eau et on peut voir que les 2 courbes ont des variations très semblables.

Nous avons donc, avec la mesure de densité par absorption γ une méthode: non destructive: pendant toutes les mesures l'échantillon n'a pas quitté sa gaine de plastique et a été ensuite utilisé pour d'autres études, plus rapide que les mesures de teneur en eau, très précise, puisqu'en éliminant les causes de dérives du détecteur et en portant le temps de comptage à 20 minutes, on arrive à une précision de 1/1000 (P. COROMPT et P. CALMELS 1964).

FIG. 25. — Courbe d'absorption γ de la carotte L 49.

CHAPITRE III

LA LIMITÉ DE LIQUIDITÉ

La limite de liquidité telle qu'elle a été définie par ATTERBERG en 1911 se mesure avec une coupelle qui, à l'aide d'une manivelle, reçoit un certain nombre de chocs. On remplit la coupelle de sédiment et avec un instrument on le divise en 2 moitiés égales. La limite de liquidité est la teneur en eau à laquelle les deux moitiés deviennent jointives sur 1,25 cm après 25 chocs de la coupelle. Le matériel utilisé et la méthode ont été normalisés par CASAGRANDE en 1932.

Pratiquement, au sédiment séché à l'air et non à l'étuve, pour ne pas trop modifier les colloïdes, on ajoute des quantités déterminées et croissantes d'eau distillée. On détermine le nombre de coups nécessaires au rapprochement des deux moitiés de sédiment pour chaque teneur en eau de l'échantillon. Il en résulte une courbe des nombres de coups en fonction de la teneur en eau d'où on tire la limite de liquidité. Nous avons effectué les mesures sur le sédiment total vue sa grande finesse.

Bien que très empirique, cette mesure donne de bonnes informations sur l'état physique du complexe vase-eau. Sa précision est de l'ordre de 1 à 2 coups pour le même opérateur et de plusieurs coups pour des opérateurs différents.

Résultats

Le nombre de chocs de la coupelle nécessaire à la jonction des 2 moitiés de l'échantillon est une fonction logarithmique de la teneur en eau.

A. Variation de la limite de liquidité en fonction de la profondeur

La limite de liquidité diminue avec la profondeur et plus exactement avec la teneur en eau initiale du sédiment. Variant entre 70 et 90% pour les sédiments superficiels, elle descend vers 40 à 50% en profondeur.

Cette remarque nous paraît importante: en effet cette mesure s'effectue à partir d'un sédiment séché à l'air et réhumecté, donc remanié: il semble ainsi garder « la mémoire » d'un état initial différent. Tout se passe comme si la déshydratation dûe à la diagénèse primaire modifiait profondément les propriétés du sédiment. Ce résultat, signifie que si pour les sédiments récemment déposés, 80 à 90% d'eau sont nécessaires pour favoriser le glissement des particules les unes sur les autres, 45% seulement suffisent pour obtenir le même effet avec des sédiments ayant déjà subi un début de diagénèse.

La diagénèse a donc modifié le sédiment dans le sens d'une plus grande aptitude au tassement.

On pourrait interpréter ce résultat comme la preuve d'une *augmentation du rapport eau liée/eau libre à un certain stade de la diagénèse précoce* des sédiments lémaniques.

Dans les sédiments de l'extrême inférieure des carottes, la limite de liquidité correspond à un pourcentage d'eau moins élevé, mais cette eau est entièrement disponible pour les mouvements inter-grains. Ce phénomène serait en relation avec la décroissance du carbone organique.

B. *Les teneurs en eau des vases superficielles par rapport à la limite de liquidité*

Dans toutes les mesures effectuées, les teneurs en eau des sédiments se situent très au-dessus des valeurs de la limite de liquidité. On pourrait en conclure que ces sédiments sont dans état de grande instabilité mécanique.

Mais il ne faut pas oublier, comme le fait remarquer A. F. RICHARDS (1962) que ces déterminations sont faites sur des échantillons extraits de leur milieu, soustraits à la pression hydrostatique. K. TERZAGHI (1955) montra que des sédiments en place peuvent présenter des résistances de plusieurs grammes par cm^2 bien que leur teneur en eau soit égale à la limite de liquidité.

CHAPITRE IV

LA PRESSION INTERSTITIELLE DANS LES VASES

Désirant savoir comment se comportait la masse sédimentaire en fonction de la pression atmosphérique et comment variait la pression interstitielle en fonction du temps, nous n'avons trouvé que de rares considérations théoriques et aucune mesure expérimentale. Nous avons donc décidé de mettre en œuvre un dispositif de mesure pour obtenir quelques notions à ce sujet. Notre choix s'est porté sur une sonde manométrique du type de celles qui sont utilisées pour mesurer les variations de pression interstitielle dans les digues de barrages. L'appareil retenu fut une sonde acoustique TELEMAC.

A. *Principe de la mesure par capteur de pression*

La fréquence d'une corde vibrante en acier croît lorsque la corde s'allonge. Si la corde est solidaire d'un milieu, d'une pièce, etc..., ses variations de fréquence renseignent sur les déformations subies par le milieu ou la pièce. Pour éviter les erreurs dues aux mesures de fréquence, on réalise l'accord entre la fréquence de la corde à mesurer et la fréquence d'une corde dont on peut faire varier la longueur d'une quantité connue. Quand les deux cordes vibrent à l'unisson, elles ont le même allongement. L'écoute se fait à distance grâce à un équipage électromagnétique.

B. *Description de l'appareillage*

La capsule de pression interstitielle est du type CL 1, gamme 0 à 5 kg/cm². La précision de la mesure est le 1/300 de la pression maximum soit 16 gr/cm². Un poste d'écoute comprenant un comparateur de précision et un diapason d'étalonnage très peu sensible à la température et à la pression complète cet appareillage. Enfin un câble de 1000 m relie la capsule immergée dans le lac au poste d'écoute situé dans le laboratoire.

C. *Mise en place*

Par suite de la finesse des vases du Léman, il était nécessaire d'isoler la capsule du contact direct de la vase par un massif de sable. La difficulté consistait à aménager le massif au sein de la vase. On construisit une cage cylindrique en grillage de mailles de 2 mm maintenue rigide par des tiges et des anneaux métalliques. A son extrémité inférieure, la cage se terminait par un cône métallique destiné à faciliter son introduction dans la vase. La cage et le cône ont 80 cm de long et 20 cm de diamètre. A la partie supérieure, une barre de métal de 1,5 m a été soudée pour permettre l'enfoncement à la main.

La capsule fut placée au centre de la cage puis entourée et recouverte de sable. L'ensemble fut installé en juin 1965 au Nord du C.R.G. par 25 m de fond. La sonde repose sous environ 1,80 m de vase soit à 26,8 m sous la surface de l'eau. Le câble fut ensuite déroulé à partir du bateau, entre la sonde et le rivage puis amené jusqu'au poste d'écoute.

D. *Résultats*

Si l'on compte pour rien la période de juin 1965 à août 1965 pendant laquelle eut lieu la stabilisation de l'ensemble du dispositif au sein de la vase, les mesures simultanées de la pression interstitielle et de la pression atmosphérique s'échelonnent sur une année, d'août 1965 à août 1966.

Toutes les observations effectuées pendant une année à raison de deux mesures par jour ont été portées sur graphique. En raison de l'encombrement d'un tel document, la figure n° 26 donne seulement un exemple des mesures.

Principales observations :

- a) Les limites supérieures et inférieures des pressions interstitielles observées sont de 2.770 et de 2.510 kg/cm².
- b) Pendant l'année d'observation, les pressions interstitielles maxima ont été observées au mois de décembre et juin et les pressions minima au mois de janvier, février et mai.

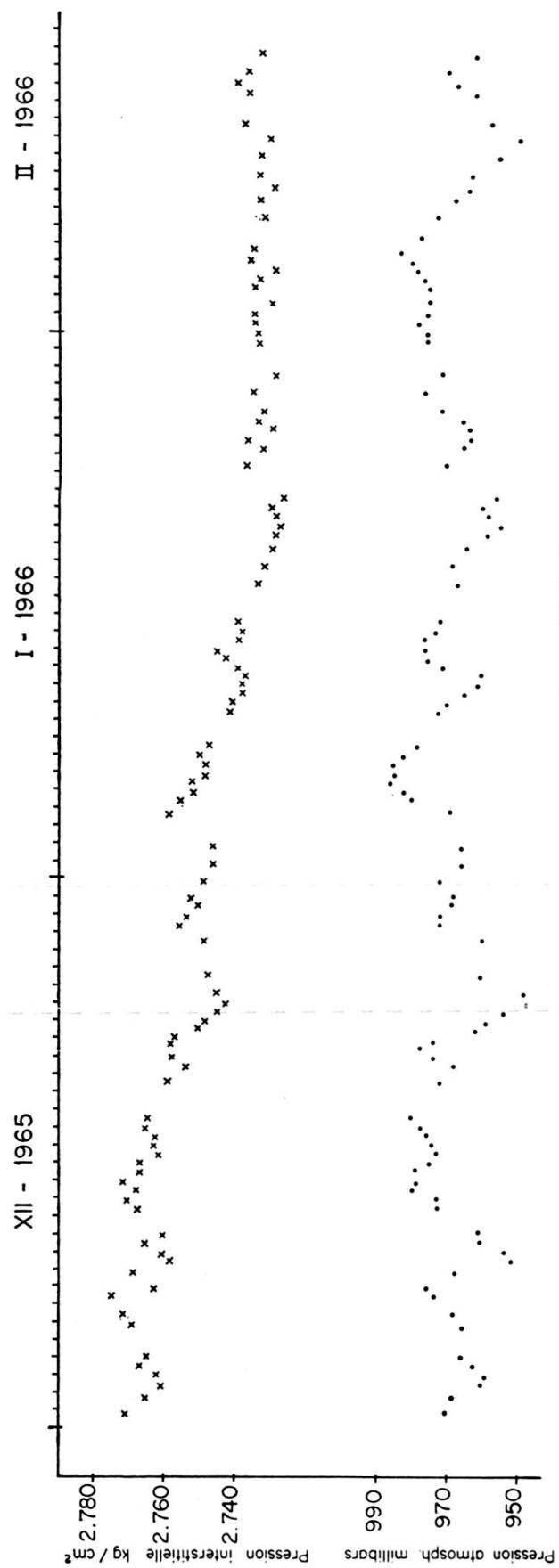


FIG. 26. — Variation de la pression interstitielle des vases.

- c) On constate sur l'ensemble de l'année, une variation parallèle de la pression interstitielle des vases et de la pression barométrique mais la première ne dépend pas entièrement de la seconde car des variations identiques de la pression barométrique n'entraînent pas toujours les mêmes variations de la pression interstitielle.

Il ne faut pas oublier en effet que les variations limnimétriques influencent également la pression interstitielle. Dans le lac Léman, pendant les mois de décembre, janvier et février, ces deux influences s'ajoutent: en effet, c'est pendant les mois d'hiver qu'on observe les plus basses eaux du lac (—1 m à --- 1,5 m); c'est aussi à ce moment qu'ont lieu les dépressions atmosphériques les plus importantes de l'année. C'est sans doute pourquoi nous obtenons en hiver les pressions interstitielles les plus faibles de l'année. Il serait également intéressant de voir quelle est l'influence des seiches sur la pression interstitielle des vases: malheureusement, l'absence de données limnigraphiques dans la région d'implantation de la sonde ne permet pas une telle étude.

Cette première année d'études ne permet pas encore de tirer des conclusions définitives quant à l'importance des variations de la pression interstitielle des vases au cours de la diagenèse primaire. Elle permet en tous cas de poser le problème et d'envisager le rôle possible de ces phénomènes. Celui-ci pourrait être très important dans le dégazage des vases et en particulier des vases côtières.

Nous avons en effet été frappés par la quantité de gaz que renferment les dépôts qu'on peut observer vers le rivage. Ces gaz, recueillis et analysés, consistent essentiellement en CO_2 et proviennent de l'oxydation de la matière organique dans la zone biologiquement active des vases. Ils se dissolvent dans l'eau interstitielle des sédiments ou adhèrent aux particules solides. En agitant la vase, on provoque un dégazage intense formant un bouillonement de grosses bulles venant crever à la surface de l'eau.

Il apparaît que les baisses de pression interstitielle que nous avons mesurées pourraient jouer un rôle analogue et être responsables d'une perte du sédiment en gaz à certaines périodes de l'année. Un tel mécanisme jouerait un rôle important dans la rapidité de tassemement des vases. De ces considérations, il ressort que:

les lacs ayant de grandes variations limnimétriques auraient les dégazages les plus importants.

les sédiments côtiers seraient beaucoup plus fortement influencés que les sédiments du large: c'est en effet pour les sédiments côtiers que la variation relative de pression interstitielle serait la plus forte au cours de l'année.

le phénomène de dégazage n'aurait pas seulement pour conséquence une modification de la structure physique du sédiment mais également un changement dans son évolution chimique puisque dans le cas du Léman par exemple la perte de CO_2 aboutit à une alcalinisation du milieu de dépôt.

Notons enfin que la corrélation entre les basses pressions atmosphériques et limnimétriques n'est pas seulement une hypothèse: lors des très faibles pressions et des basses eaux de fin décembre 1965, nous avons observé des émissions importantes et spontanées de gaz à partir des sédiments du port du C.R.G. qu'on n'observe pas à d'autres époques de l'année.

CHAPITRE V

PROPRIÉTÉS ÉLECTROCHIMIQUES DES VASES

A. *Expérience préliminaire*

Au cours d'expériences de laboratoire visant à améliorer notre technique de mesure du potentiel d'oxydo-réduction, nous avons constaté qu'entre deux électrodes de Nickel ou deux électrodes de Platine, l'une placée dans la vase, l'autre dans l'eau, nous obtenions une certaine différence de potentiel. Après avoir fabriqué des électrodes en Nickel ajustées sur un long tube de plastique, nous avons voulu vérifier si le même phénomène se produisait en eau libre, dans les vases organiques de la rive du lac. Un des fils de Nickel fut placé dans la vase, l'autre dans l'eau et les mesures furent effectuées avec un potentiomètre Beckman.

Les observations qui furent faites sont les suivantes:

les deux électrodes étant convenablement placées, on observe une différence de potentiel de 300 à 500 millivolts (mv),
 la valeur du potentiel dépend de l'état de la surface de séparation entre la vase et l'eau. *Cette interface vase-eau joue le rôle d'une membrane semi-perméable,* le potentiel croît avec la luminosité. Par des journées très ensoleillées, on obtint 700 mv,
 la tension dépend aussi de la hauteur de vase explorée par l'électrode. Dans nos conditions d'expérience, le potentiel s'arrête de croître lorsque l'électrode a pénétré de 10 à 15 cm dans la vase.

C'est toujours l'électrode enfouie dans la vase qui est l'électrode négative.

B. *Expériences au laboratoire*

Dans un cristallisoir de 27 cm de diamètre, de la vase noire est déposée et recouverte d'eau du lac. Deux électrodes en fil de nickel agencé en spires formant une grande surface, sont placées l'une dans la vase, l'autre dans l'eau. On observe une différence de potentiel de 500 mv; l'électrode plongeant dans la vase constitue tout comme dans le lac l'électrode négative.

Si on court-circuite les deux électrodes, on observe, après quelques jours, le changement de couleur de la partie inférieure de la vase au contact de l'électrode négative: la vase devient très claire presque blanche. Avec le temps la hauteur de la vase claire augmente.

Ces expériences ont été reprises avec le couple Zn-Cu comme électrode; la f.e.m. en circuit ouvert du couple Zn-Cu dans l'eau du lac est de 820 m.v Dans notre expérience le Zn immergé dans la vase constitue le pôle négatif. La f.e.m. en circuit ouvert est alors de 1000 à 1050 mv; la vase est plus électronégative que le Zinc et l'association vase-Zn-Cu fournit 200 mv de plus que le couple Zn-Cu. Le montage en série de trois de ces piles à vase suffit pour allumer une ampoule.

Le court-circuit du système entraîne les conséquences suivantes:

la vase devient très rapidement de couleur très claire au voisinage de l'électrode négative,

le pH de l'eau augmente de façon très notable et passe de 7,2 à 9,2 après 24 heures.

Une autre série d'expériences analogues a été réalisée avec de la vase noire du lac de Nantua. Deux cuves ont été équipées comme précédemment indiqué: l'une a été mise en court-circuit, la seconde laissée en circuit ouvert. Les variations du pH et le voltage ont été les suivants:

Temps écoulé:	0 h	3 h	24 h	2 j	3 j	4 j	5 j
pH en court circuit	7,6	8,5	10,0	9,4	9,35	9,1	9,05
pH en circuit ouvert	7,6	7,6	7,8	7,8	7,8	7,9	7,9
Voltage en mv			1020	1050	1050	1040	1040

Si on poursuit l'expérience pendant une dizaine de jours on observe:

- 1^o Une baisse de pH dans la cuve en court-circuit,
- 2^o Si on ouvre le circuit et qu'on mesure la tension une fois qu'elle est stabilisée, on obtient une f.e.m. de 920 mv intermédiaire entre celle du couple Cu-Zn et celle de la pile Cu-Zn-vase,
- 3^o L'analyse de l'eau donne alors les résultats suivants, comparés à sa composition initiale:

Eléments en mg/1:	Ca	Mg	Na	K	SO ₄
Eau initiale	46,4	3,16	1,35	0,85	8,6
Eau après 10 jours de court-circuit	19,2	8,0	3,0	5,0	2,0

- 4^o Le phénomène semble s'accompagner d'un drainage important de l'eau car en fin d'expérience la couche blanche a une teneur en eau de 177% par rapport au poids sec alors que initialement la teneur en eau de la vase noire était de 220%. Il y aurait donc une sorte d'électro-osmose vers le pôle positif.

Il serait intéressant de préparer un grand nombre de cuves identiques et de les sacrifier régulièrement aux fins d'analyses de façon à voir le film des phénomènes qui prennent place au cours de cette diagénèse électro-chimique de la vase.

De plus nous n'avons pas abordé le problème des modifications des macromolécules (cellulose, lignine, chaînes protidiques, produits humiques divers) introduites par le champ électrique. Or, des expériences récentes montrent que des différences de potentiel de l'ordre de 10 à 20 mv peuvent modifier la structure de certaines chaînes protidiques (expériences du Prof. Monnier de l'Université de Paris).

Des phénomènes analogues se produisent-ils dans les conditions naturelles ? Des court-circuits naturels peuvent-ils avoir lieu dans certaines régions des bassins sédimentaires et provoquer des transports ioniques ?

Revenons sur le rôle de la lumière dans les phénomènes précités : il est probable que les radiations interviennent en activant la photosynthèse. L'oxygène dégagé servirait d'accepteur d'électrons. On voit dans ce cas que les zones bordières des bassins sédimentaires sont dans des situations très particulières : la distance entre la couche productrice d'oxygène, par le phytoplancton autotrophe, et la vase est beaucoup plus faible qu'au centre des bassins, autrement dit la distance entre les pôles virtuels de la pile diminue vers les bordures des bassins.

Cette activité électro-chimique pourrait expliquer en particulier la répartition de certains métaux traces et le mouvement d'eau de la vase vers l'interface vase-eau. C'est ainsi que le Professeur Chillingar de l'Université de Californie a obtenu la néoformation de gibbsite, limonite, hydrogoethite, etc. en appliquant à un système eau-vase des tensions de 200 mv (C. SERRUYA, L. PICARD et G.V. CHILLINGARIAN 1967)

CHAPITRE VI

LA LIAISON EAU-VASE A L'ÉCHELLE DU CRISTALLITE D'ARGILE

L'étude expérimentale de la liaison eau-sédiment se présente comme une étude quantitative des énergies de liaison. Ceci nécessiterait des recherches de physique. Néanmoins, pour « situer » les énergies de liaison de l'eau et des vases du Léman, nous avons réalisé des courbes de déshydratation.

MODE OPÉRATOIRE

Le matériel à déshydrater est placé dans de petits vases de pyrex à couvercles rôdés et soigneusement pesé. Ils sont alors placés, ouverts, dans une étuve à 105° ne contenant aucun autre récipient ; ils sont pesés toutes les 30 minutes jusqu'à poids

constant. Les résultats sont exprimés en pourcentage du poids sec. Nous avons mesuré la déshydratation de la carotte L 63 et par comparaison la déshydratation dans les mêmes conditions du kaolin lavé Prolabo, humecté d'eau distillée, du kaolin humecté d'une solution de Cl Na N/10 et d'un mélange aqueux de kaolin et de bentonite en proportions égales. Tous ces échantillons avaient des teneurs en eau égales ou voisines de 150% par rapport au poids sec. Dans ces conditions, la quantité d'eau qui s'évapore par unité de temps est inversement proportionnelle à l'énergie de liaison.

RÉSULTATS

La figure n° 27 montre que les pentes des courbes de déshydratation obtenues varient dans de larges limites:

le kaolin humecté d'eau distillée a les plus faibles liaisons,
la présence de Cl Na les accroît notablement. La différence entre cette courbe et la précédente correspond à l'eau qui s'est fixée sur le cation Na;
le mélange kaolin-bentonite présente la plus grande résistance à la déshydratation;
les trois niveaux de vase lémanique ont en gros la même courbe qui se situe à peu près à égale distance entre la courbe du kaolin Cl Na N/10 et la courbe du mélange kaolin-bentonite.

Cette méthode permet de voir que dans les sédiments lémaniques l'eau est retenue assez solidement.

D'autres expériences dans ce sens ont été faites par de nombreux auteurs: J.K. MITCHELL (1960) montra qu'à une pression donnée, les plus grandes distances interparticulaires d'une montmorillonite saturée avec des solutions de Cl Na, correspondaient aux concentrations électrolytiques les plus faibles. J.H. BOLT (1956), B.P. WARKENTIN et R.K. SCHOFIELD (1960) montrèrent que les résultats obtenus avec le mélange montmorillonite-Cl Na étaient en accord avec les prévisions théoriques qui pouvaient être faites à partir de l'hypothèse de la double couche. Des expériences de K. NORRISH (1954) mirent en évidence que la distance interparticulaire d'une montmorillonite-Cl Na était inversement proportionnelle à la racine carrée de la concentration de l'électrolyte.

Avec des mélanges illite-Cl Na, les auteurs ont obtenu des résultats analogues lorsque l'illite est très fine mais opposés lorsque celle-ci est plus grossière. R.H. MEADE pense que ce comportement est dû à la flocculation des illites aux concentrations élevées et qu'alors les particules ont moins de liberté pour se réorienter. Lorsque les argiles sont mêlées à des solutions naturelles contenant Ca, Mg ou Al, leur gonflement ne dépasse pas 9 Å ce qui serait dû au fait que dans ces argiles l'eau occupe l'espace interlamellaire et les pores situés entre les agrégats (BLACKMORE et MILLER, 1961).

Enfin, l'influence des concentrations électrolytiques sur la compaction des sédiments fins est nulle pour des pressions supérieures à 30 kg/cm² (W. VON ENGELHARDT et K.H. GAIDA, 1963).

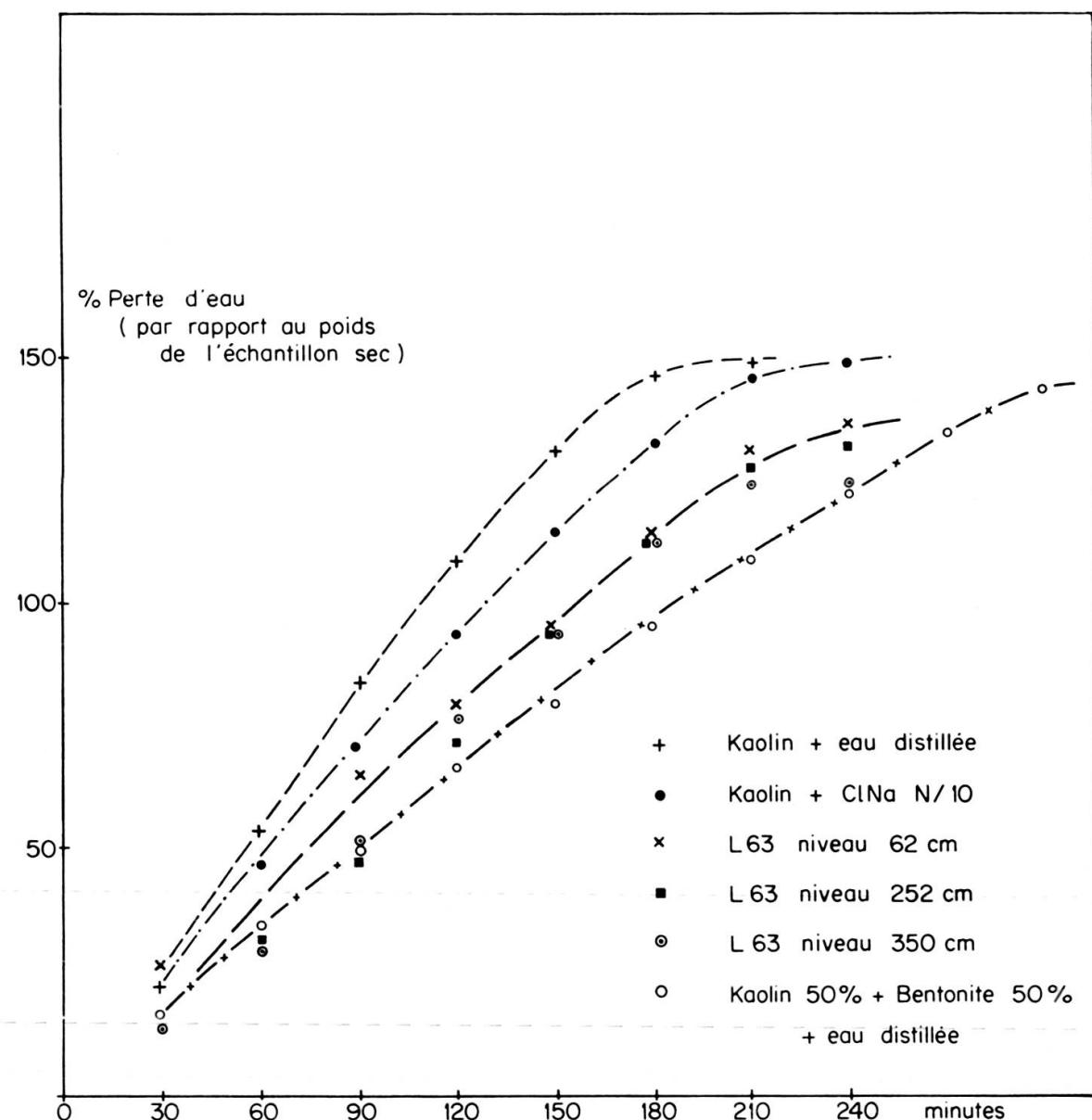


FIG. 27 — Courbes de déshydratation comparées des vases du Léman et de différentes argiles.

SIXIÈME PARTIE

RECHERCHES MÉTHODOLOGIQUES POUR L'ÉTUDE DES SYSTÈMES LIMNOLOGIQUES ET SÉDIMENTAIRES

Le limnologue étudie un microcosme et ne peut manquer d'être frappé par l'enchevêtrement des phénomènes qu'il observe dans le milieu lacustre. S'il a décidé d'étudier la seule productivité primaire par exemple, il se rend vite compte que son étude n'aura de sens que s'il étudie aussi la transmission de la lumière, la température, la répartition des substances nutritives dans l'eau, les courants, les débits des affluents du lac, la composition du plancton etc... Autrement dit, la recherche limnologique, pour être valable, exclut par sa nature même le travail isolé. Elle se rapproche en ce sens de la recherche océanographique, mais la limnologie a sur l'océanographie un avantage considérable: la masse d'eau, d'organismes et de sédiments d'un lac sont plus proches de l'échelle humaine que ceux de l'océan.

Un lac est donc un excellent modèle réduit dont on peut, dans certains cas favorables, mesurer simultanément un grand nombre de caractéristiques.

Les problèmes inhérents à la recherche limnologique sont de deux ordres:
les problèmes technologiques relatifs à la mesure simultanée d'un grand nombre de paramètres;
les problèmes méthodologiques qui naissent de notre ignorance du déroulement intime des processus métaboliques lacustres.

LES PROBLÉMES TECHNOLOGIQUES DE MESURE

Dans certains secteurs des études limnologiques, ces problèmes sont partiellement résolus par les mesures automatiques. C'est ainsi qu'on obtient d'excellents enregistrements limnimétriques, des profils thermiques sont établis avec rapidité et précision et peuvent d'ailleurs être automatisés. En gros, on peut dire que les paramètres météorologiques et certains paramètres physiques tels que la température, la conductivité, peuvent être mesurés en continu avec une bonne précision.

L'incertitude est déjà plus grande dans les mesures hydrologiques concernant les débits des affluents du lac: de nombreux exemples montrent que les débits de crue sont fréquemment difficiles à évaluer correctement d'où des erreurs importantes dans les bilans hydrologiques des lacs.

Les mesures de pH et de Eh — mesures physico-chimiques — présentent de sérieuses difficultés: effectuées sur des échantillons remontés en surface, on ne s'occupe alors pas de l'influence de la pression et de la température qui s'exercent sur l'eau

in situ. Par contre, si les mesures sont effectuées par des électrodes sondes, elles sont souvent affectées par des phénomènes parasites: mémoire de l'électrode de Platine qui a traversé un milieu réducteur, par exemple.

Les mesures purement chimiques ont souvent une bonne précision mais peuvent rarement être faites en continu. Il faut prélever l'échantillon, ce qui a l'inconvénient de provoquer des décompressions qui ne doivent pas être négligeables dans les analyses de gaz dissous, et pratiquer l'analyse au laboratoire. Les recherches des grandes firmes tendent d'ailleurs à automatiser les mesures chimiques: par exemple la mise au point des mesures électrométriques de l'oxygène dissous et du SH_2 .

On pénètre dans un autre domaine lorsqu'il s'agit de déterminer les substances nutritives dans l'eau. Si les nitrates et les phosphates sont maintenant des analyses de routine, la détermination du Carbone organique dans l'eau, des sucres, des acides aminés, des éléments traces, fait appel à des techniques longues à mettre en œuvre comme la chromatographie ou encore trop récentes et trop onéreuses pour être faites en série: analyse par radioactivation.

Les données biologiques nécessaires à connaître sont, quant à elles de deux types:

qualitatives: détermination des espèces de la faune et de la flore planctonique et benthique qui ne peut être faite que sur des prélèvements;

quantitatives: pour le plancton autotrophe, nous disposons, avec la technique du C^{14} d'une technique assez pratique bien qu'on ne soit pas sûr comme le souligne G.W. SAUNDERS (1963) que l'assimilation de l'isotope radioactif soit la même à des températures et des éclairements variables.

Les mesures deviennent beaucoup plus compliquées et imprécises lorsqu'il s'agit de dénombrer les bactéries. On peut procéder par comptage direct qui est long, difficile et peu sûr, ou par ensemencement sur milieu stérile. Mais alors rien ne nous garantit que telle bactérie, abondante dans le milieu naturel n'a pas été ralentie dans son développement sur le milieu de culture. Par rapport à d'autres espèces qui prolifèreraient pareillement sur les deux milieux, la proportion représentant la première espèce serait artificiellement abaissée. Or la population bactérienne des lacs est importante à connaître puisque la minéralisation des matières organiques se fait presque intégralement par leur intermédiaire. Il en résulte que de l'intensité et de la vitesse de ces processus dépend l'enrichissement d'un milieu lacustre par recyclage des produits de minéralisation.

Ce bref examen des problèmes technologiques met en évidence le décalage dans une étude limnologique entre la rapidité et la précision de certaines mesures physiques, la relative précision mais la lenteur des mesures chimiques et la lenteur aussi bien que l'incertitude des comptages bactériens. Il y a là une anomalie technologique qui freine beaucoup le développement de la recherche sur le métabolisme des lacs.

On trouve une situation analogue en sédimentologie où des méthodes géophysiques simples et faciles à mettre en œuvre permettent l'investigation de tréfonds des lacs et des océans sous plusieurs centaines de mètres d'eau et de vase et où, par contre, il n'existe pas de méthode simple de carottage qui permettent d'obtenir un échantillon réel de vase à plus de 20 m sous la surface de la vase.

LES PROBLÈMES MÉTHODOLOGIQUES

Supposons résolus les problèmes technologiques. Il faudrait encore une méthode qui rende possible l'utilisation rationnelle des résultats fournis par les mesures. C'est-à-dire que nous devrions connaître l'enchaînement des causes et des effets qui sous-tendent la dynamique lacustre. Or nous sommes loin de cet idéal.

Cette situation n'est pas sans rappeler celle qui régna longtemps en hydrologie: on savait bien que la pluie recharge les nappes, mais il fallut attendre le développement de la pédologie, de la physique des sols et de recherches spéciales sur l'écoulement en milieu naturel non saturé, pour avoir une idée du mécanisme de l'évaporation, de l'infiltration, en un mot, de la dynamique de recharge des nappes. Alors que les premières formules admettaient des coefficients empiriques intégrant un grand nombre de variables, les formules actuelles se sont affinées et font intervenir la porosité du sol, effectivement mesurée, les variations de la succion, etc...

Cette évolution est le résultat d'études à grande échelle sur les bassins versants expérimentaux où pour la première fois et grâce aux progrès technologiques, on a pu mesurer en même temps les caractéristiques météorologiques et particulièrement les précipitations, la remontée des nappes, les variations d'humidité et de succion dans la zone désaturée de l'hydrosphère etc... Cette amélioration s'est aussitôt fait sentir sur les techniques de prévision et permet actuellement d'établir des programmes d'exploitation des nappes aquifères avec un pourcentage d'erreur remarquablement faible. L'élaboration des formules actuelles n'a été possible qu'à partir du moment où on a pu faire des *bilans hydrologiques*. En limnologie, un tel travail reste à faire.

Il serait pour cela souhaitable qu'un lac expérimental soit choisi, de dimensions compatibles avec un équipement hydrologique, météorologique, hydrobiologique et sédimentologique, aussi complet que possible. Pendant un certain nombre d'années, la mesure simultanée d'un grand nombre de paramètres permettrait d'approcher de plus près le mécanisme intime des phénomènes limnologiques. Une tentative a été faite en France par la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique (D.G.R.S.T.) au lac de Nantua (Ain) et mise sur pied par S. Serruya, mais l'équipement en est encore insuffisant. Cependant les mesures obtenues sur le Léman et à Nantua nous ont permis de réfléchir aux équilibres hydrobiologiques et sédimentaires.

Du point de vue thermodynamique, un lac est un système ouvert qui reçoit son énergie ou tout au moins une grande partie de celle-ci, de l'extérieur sous forme de rayonnement solaire. Or l'énergie solaire met en marche un grand nombre de phénomènes limnologiques: réchauffement des eaux de surface et stratification thermique, transmission du rayonnement dans l'eau, photosynthèse... Chacune de ces actions modifie le milieu initial et c'est sur un milieu continuellement changé que s'exercent les actions ultérieures.

Comment analyser quantitativement un phénomène complexe à très nombreuses variables et en perpétuelle évolution ?

Il semble que toute méthode sera incomplète ou arbitraire. Il est aisément d'imaginer qu'aucune méthode ne nous donnera d'emblée une solution parfaite. Il est souvent profitable dans de tels cas d'élaborer une technique d'analyse approchée: les renseignements que cette technique nous fournira sur les mécanismes des phénomènes étudiés réagiront sur l'outil analytique en le perfectionnant. Pour élaborer un tel outil de travail, trois observations sont fondamentales:

1^o *Le degré de dépendance des paramètres*

Bien que les paramètres qui interviennent dans la dynamique lacustre aient entre eux de multiples liaisons, on peut essayer de les classer. En effet, l'ensoleillement et la température dépendent de nombreux facteurs cosmiques, mais, à l'échelle des lacs, ils sont fondamentaux.

Nous nous proposons ainsi de doter chaque paramètre d'un numéro d'ordre qui reflètera son degré de dépendance. L'énergie solaire serait donc d'ordre I. Naturellement, chaque paramètre agira directement ou indirectement sur tous les paramètres d'ordre plus élevé et sera soumis lui-même à l'influence de tous les paramètres d'ordre inférieur. La liste suivante, certainement incomplète, est toute provisoire:

Paramètres	Numéro d'ordre
Ensoleillement, température	1
Vents	2
Précipitations	3
Débits liquides des rivières	4
Débits solides des rivières	5
Température de l'eau du lac	6
Courants	7
Composition chimique de l'eau	8
Productivité organique primaire	9
Oxygène dissous	10
Catabolisme dans l'eau	11
Sédimentation	12
Minéralisation dans la vase	13
Echanges vase-eau	14

2^o *Les actions en retour*

L'évolution limnologique procède suivant le mécanisme des actions directes et des actions en retour irréversibles (feed back de la cybernétique). L'augmentation de la température à partir de Mars entraîne l'accroissement de la production organique qui a pour conséquence la diminution de la transparence, qui à son tour provoque un manque à gagner en calories des zones profondes... Tous ces phénomènes sont uniques et historiques, car jamais le milieu n'est deux fois de suite le même et de plus ils sont irréversibles.

En conséquence, la seule méthode d'analyse valable est la *méthode des bilans successifs*.

3^o *Le phénomène sédimentaire*

Dans un lac, le phénomène sédimentaire est le seul qui intègre absolument tous les phénomènes qui ont eu lieu. Le sédiment constituera donc le second terme des bilans, autrement dit, telle succession d'évènement doit conduire au dépôt de tel sédiment dont la composition chimique, minéralogique, organique, la teneur en eau, etc... sera le résultat inévitable des phénomènes enregistrés.

Il est évident que le phénomène sédimentaire ne met pas un terme à l'évolution du milieu. Lui aussi provoque une action en retour sur le milieu, essentiellement par l'intermédiaire des substances qui filtrent à travers l'interface vase-eau.

MÉTHODE PERMETTANT DE CONDUIRE L'ANALYSE

Soit X^o le moment de démarrage de l'analyse. On va commencer par examiner à cette date les conditions atmosphériques: quantité d'énergie solaire arrivant sur le lac, hauteur des pluies, directions des vents... puis on va rechercher l'influence de ces facteurs sur les paramètres de degré de dépendance plus élevé et établir, pour la période considérée, les relations quantitatives qui les lient.

C'est ainsi qu'à un apport accru d'énergie solaire correspondra une certaine augmentation de la température de l'eau et qu'une crue sera suivie d'une élévation connue du niveau du lac. Ces modifications réagissent à leur tour et d'une quantité mesurable sur les paramètres d'ordre supérieur. Par exemple, la variation de température de l'eau provoque la formation de courants qui à leur tour vont modifier la composition chimique de l'eau et la répartition du plancton et par conséquent la productivité primaire, etc... Tous ces événements réagissent sur la quantité et la répartition de l'oxygène dissous et par voie de conséquence sur le catabolisme dans l'eau et la nature et la vitesse de minéralisation des vases.

Etant donné que tous les paramètres cités sont mesurables, on peut espérer lorsque les progrès technologiques suffisants auront été faits, pouvoir exprimer quantitativement cet enchaînement d'évènements. Au temps X¹, à la fin de la période

d'analyse, le milieu est totalement différent de ce qu'il était en début d'analyse et c'est à partir de cette situation nouvelle que va s'effectuer le deuxième bilan.

De nombreuses difficultés sont inhérentes à cette méthode. En particulier, si le délai écoulé entre X^0 et X^1 est trop long, l'analyse est impossible par suite du nombre d'actions en retour qui seront intervenues. Cela suppose donc que les bilans soient effectués sur des périodes très courtes de l'ordre de la journée ou de la demi-journée. Par ailleurs il est possible qu'un paramètre n'engendre des conséquences qu'après un certain temps de latence. Ainsi l'augmentation de température de l'eau n'a lieu que plusieurs heures après le réchauffement de l'air. Il faut donc pouvoir comparer des bilans successifs.

Un pareil travail ne peut être fait que si l'on confie à des calculatrices l'essentiel de la comptabilité des bilans et à des ordinateurs plus évolués la recherche des relations quantitatives entre les différents paramètres. Les machines permettront également de comparer entre elles les multiples relations obtenues dans des conditions chaque fois différentes. C'est de la comparaison de plusieurs milliers de ces équations qu'on pourra établir des lois générales.

Au cours de cet énorme travail, on s'apercevra que certains paramètres ont été négligés ou qu'ils interviennent différemment et tout comme en hydrologie, la recherche modifiera sans cesse l'outil analytique.

Une tentative de ce genre a été faite pour l'analyse des données obtenues par l'équipe de la Station d'Hydrobiologie Continentale (INRA) à Nantua. La fréquence de certaines mesures (productivité, bactériologie) ne permit que des bilans mensuels très grossiers. Néanmoins, les douze bilans d'une année mirent en évidence l'influence de certaines crues de printemps sur la productivité, les courants engendrés par ces crues et les modifications du chimisme qui en résultent.

Un tel travail suppose une équipe nombreuse pouvant compter sur une infrastructure technologique et scientifique très solide et sur une importante coopération internationale. Une période d'étude de dix années paraît raisonnable.

BIBLIOGRAPHIE

- ALSTERBERG, G. 1927. Die Sauerstoffsichten der Seen. *Bot. Notiser* 25: 255-274.
- ANDERSON, D. Q. 1939. Distribution of organic matter in marine sediments and its availability to further decomposition. *Jour. Marine Res.* 2,3: 225-235.
- ANDERSON, R. Y. 1964. Varve calibration of stratification. *Kansas Geol. Survey Bull.*, t. 169: 1-20.
- , L. H. KOOPMANS. 1963. Harmonic analysis of varve time series. *Journ. Geophys. Res. USA* 68,3: 877-893.
- , D. W. KIRKLAND. 1966. Intrabasin varve correlation. *Geol. Soc. of Amer. Bull.* 77: 241-256.
- ANTONESCU, G. S. 1931. Über das Vorkommen eines ausgeprägten metalimnischen Sauerstoffminimus in einen See. *Archiv. f. Hydrobiol.* 12: 580-596.
- ARRHENIUS, G. 1950. Carbon and Nitrogen in subaquatic sediments. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 1,1: 15-21.

- AUBERT, D. 1936. Les terrains quaternaires de la vallée de l'Aubonne. *Bull. Lab. Géol. Lausanne*, n° 55.
- 1945. Le Jura et la tectonique d'écoulement. *Mém. Soc. Vaud. Sc. nat.*, 8, 4: 217-236.
- 1959. Le décrochement de Pontarlier et l'orogenèse du Jura. *Mém. Soc. Vaud. Sc. nat.*, 12, 4, 76: 93-152.
- BADER, R. G. 1955. Carbon and Nitrogen in surface and subsurface marine sediments. *Geoch. Cosmoch. Acta* 7: 205-211.
- BADOUX, H., MERCANTON, C. H. 1962. Essai sur l'évolution tectonique des Préalpes médianes du Chablais. *Eclog. Geol. Helv.*, 55, 1: 137-186.
- 1963. A propos des Préalpes de Chablais. *Livre Jubilaire du professeur Fallot*, tome II: 379-382.
- BERSIER, A. 1939. Recherche sur la géologie et la stratigraphie du Jorat. *Mém. Soc. Vaud. Sc. nat.*, 6, 3.
- 1947. Un thalweg préwürmien de la Paudèze, affluent du lac Léman. *Bull. Lab. Géol. Lausanne*, n° 86: 1-6.
- , J. P. VERNET. 1964. Etudes sédimentologiques dans la Chodelar. *Bull. Soc. Vaud. Sc. nat* 314, 68.
- BÉTANT, A., G. PERRENOUD. 1932. Etudes sur la partie occidentale du lac de Genève. Courants et températures. *Mém. Soc. Phys. et Hist. nat. Genève*, 41, 2: 224-293.
- BIRCHER, H. 1954. Recherches sur un problème de limnologie: les dénivellations du lac Léman. *C.R. Comm. Eaux Surf. A.I.H.S.* 36: 46-51.
- BIRGE, E. A., C. JUDAY. 1929. Transmission of solar radiation by the waters of inland lakes. *Trans. Wisc. Acad. Sc. Arts Lett.* 24: 509-580.
- , C. JUDAY. 1911. The inland lakes of Wisconsin. The dissolved gases of the water and their biological significance. *Wisc. Gel. Nat. Hist. Surv. Bull.* 22: 1-259.
- BLACKMORE, A. V., R. D. MILLER. 1961. Tactoid size and osmotic swelling in Ca Montmorillonite. *Soil Sc. Soc. Am. Proc.* 25: 169-173.
- BLAVOUX, B., B. DUSSART, MANEGLIER, SALVETTI. 1962. La région du lac Léman au point de vue hydrométéorologique. *Globe*, t. 102, Soc. Géogr. Genève.
- , Ph. OLIVE. 1966. Dosage du potassium par spectrométrie sur les carottes de cinq sondages réalisés dans le Quaternaire d'Evian. *Geol. Rundschau* 55-1: 216-226.
- BOCKEL, M. 1962. Projet d'une étude des propriétés acoustiques du fond de la mer, in « Océanographie géologique et géophysique de la Méditerranée occidentale ». *C.N.R.S.*, 59-62.
- BOLT, J. H. 1956. Physico chemical analysis of the compressibility of pure clays. *Geotechnique* 6: 86-93.
- BOURCART, J., C. FRANCIS-BOEUF. 1942. *La vase*. Hermann, Paris.
- BOURDIER, F. 1937. Nouvelles observations sur l'extension des anciens glaciers dans la basse vallée de l'Isère. *C. R. Acad. Sc.*, 25 janvier 1937.
- BROUARDEL, J., E. RINCK. 1963. Mesure de la production organique en Méditerranée dans les parages de Monaco, à l'aide du ^{14}C . *Annales Inst. Océanogr.*, XL, 2: 109-164.
- et C. SERRUYA. 1967. Mesure de la production organique dans le lac Léman à l'aide de ^{14}C . *Annales de Limnologie*, t. 3, fasc. 2, pp. 299-330.
- BRUCKMAN, W. 1930. Erdmagnetische Vermessung der Schweiz (Allgemein deklination). *Annalen der Schweiz Meteo Zentralanstalt*.
- BRUEVICH, S. V. 1945. Sur l'humidité des sols de la mer Caspienne. *Dan URSS*, n° 47, 4.
- BRUN, A. 1966. Révision de la stratigraphie des dépôts quaternaires dans la basse vallée de la Drance (H. S.). *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, VIII, 5.
- BUFFLE, J.-P. 1940. Séparation et détermination quantitative des matières organiques en suspension dans l'eau. *C. R. Soc. Phys. Hist. nat. Genève* 57, 4: 277-280.
- BURKARD, P. 1963. *Rapport sur l'étude des affluents du lac Léman*. Comm. intern. pour la protection eaux Léman et Rhône contre la pollution. 25 p.
- CAPART, A. 1949. Exploration hydrobiologique du lac Tanganyika. Sondages et carte bathymétrique. *Inst. royal Sc. nat. Belgique*, 2, 2.
- CASAGRANDE, A. 1932. Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads*, vol. 13.

- CHEMINEE, J. L., D. NORDMANN. 1963. Dosage du Potassium, de l'Uranium, du Radium et du Thorium par spectrométrie dans les laves d'Auvergne, du Velay et de la province sicilienne. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 7^e série 5: 218-231.
- COIT, C. E. 1925. Nouvelles recherches sur la sédimentation dans le lac de Genève. *C. R. Congrès intern. Géogr.* 2: 59-69, Le Caire.
- COROMPT, P., P. CALMELS. 1964. Performances d'une jauge d'épaisseur à chaîne ouverte pour la mesure de migration d'humidité. *Rapport du Départ. Radioéléments S.A.R. du C.E.N. Grenoble*.
- CZECZUGA, B. 1959. O minimum i maksimum tlenowym w metalimnionr Jezior Rajgrodzkich. *Acta Hydrobiol.*, 1, 2: 109-122.
- 1965. Quantitative changes in sedimentary chlorophyll in the bed sediment of the Mikolajki lake during the postglacial period. *Revue suisse d'Hydrol.*, 27, 1: 88-98.
- D'ALBISIN, M. 1963. Les traces des déformations dans les roches calcaires. Thèse *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, vol. 5, fasc. suppl.
- DEBENEDETTI, A. 1958. On mechanical activation of thermoluminescence in calcite. *Nuovo cimento, Italia* 7: 251-254.
- DELEBECQUE, A. 1898. *Les lacs français*. Paris.
- DUPLAIX, S., S. GUILLAUME. 1962. Etude stratigraphique et minéralogique des formations tertiaires du Jura. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, V, 1: 37-54.
- DUSSART, B. 1954. Températures et mouvements des eaux des lacs. Introduction à l'étude d'un milieu. *Ann. Stat. Cent. Hydrobiol. appl.* 5: 1-28.
- 1955 Détection des sources sous-lacustres et incidence de celles-ci sur le fond des lacs. *Mém. Ist. Ital. Idrobiol.*, Suppl. 8: 63-82.
- DUSSART, B., J. JUGET, J. SITARZ. 1959. Les sables des dunes lémaniques, conditions de transport, nature. *Arch. Sci. Genève*, 12, 1.
- EMERY, K. O., S. C. RITTENBERG. 1952. Early diagenesis of California basin sediments in relation to origin of oil. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.* 36: 735-806.
- 1960. *The sea off Southern California, a modern habitat of petroleum*. New York, John Wiley and sons, Inc., 336 p.
- , J. HULSELMANN. 1962. Santa Barbara Basin, a semi-euxinic sedimentary environment. *Geol. Soc. Amer. Spec.*, paper n° 68: 23-24.
- ENGELHARDT, W. (von), K. H. GAIDA. 1963. Concentration changes of pore solutions during compaction of clay sediments. *Journ. Sed. Petr.* 33: 919-930.
- EPSTEIN, S., R. BUSCHBAUM, H. A. LOWENSTAM, H. C. UREY. 1953. Revised water isotopic temperature scale. *Bull. Soc. Geol. Amer.* 64: 1315-1326.
- FABRE, J. 1935. Histoire malacologique du lac de Genève. *Mém. Soc. Hist. nat. Genève*, 41, 3: 295-414.
- FINDENEGG, I. 1965. *Factors controlling primary production especially with regard to water replenishment, stratification and mixing*. Proc. of Symp. on Primary prod. in Aquatic environments Pallanza, Italy. Mem. Ist. Ital. Idrobiol. 18 suppl.: 105-119.
- FOREL, F. A. 1892. Transparence des eaux du Léman. *Recueil inaugural de l'Université de Lausanne*, p. 445.
- 1895-1904. *Le Léman*. Monographie limnologique. 3 vol.. F. Rouge, Lausanne.
- FOURNIER, F., S. HENIN. 1962. Etude de la forme de la relation existant entre l'écoulement mensuel et le débit solide mensuel. *Assoc. Inter. Hydrol. Sc. pub.*, n° 59: 353-358.
- GAGNEBIN, E. 1937. Les invasions glaciaires dans le bassin du Léman. *Bull. Lab. Géol. Lausanne*, n° 58: 1-82.
- 1939 Découverte d'un lambeau de la nappe de la Simme dans les Préalpes du Chablais. *C.R. Acad. Sc.* 208, p. 822.
- GIGNOUX, M., L. MORET. 1938. Description géologique du bassin supérieur de la Drance. *Trav. Lab. Géol. Grenoble*, vol. 21.
- GLANGEAUD, L. 1948. Les nouvelles théories sur la formation du Jura. *B.S.H.N. Doubs*, n° 52: 5-15.
- 1949. Les caractères structuraux du Jura. *B.S.G.F.*, 5^e série, t. XIX: 669-688.
- 1951. Les problèmes du Jura. Réunion extraordinaire dans le Jura franco-suisse. *B.S.G.F.*, 6^e série, t. 1, fasc. 9: 765-775.

- , O. LEENHARDT, C. SERRUYA. 1964. Structures enregistrées par le mud penetrator dans les sédiments quaternaires du Léman. *C. R. Acad. Sc.*, 258: 4816-4818.
- GOLDMAN, C. R. 1960. Molybdenum as a factor limiting productivity in Castle lake California. *Science*, 132, 3433: 1016-1017.
- 1964. Primary productivity and micro-nutrient limiting factors in some North American and New Zealand lakes. *Verh. Inter. Verein Limnol.* 15: 365-374.
- , R. G. WETZEL. 1963. A study of the primary productivity of Clear Lake, Lake County, California. *Ecology U.S.A.*, 44, 2: 283-294.
- GONET, O. 1963. Les anomalies de gravité dans le canton de Vaud. *Mém. Soc. vaud. Sc. nat.*, n° 311, vol. 68.
- 1965. Etude gravimétrique de la plaine du Rhône. Thèse. *Mat. Carte Géol. Suisse, Géophysique*, n° 6.
- GORHAM, E. 1958. The influence and importance of daily weather conditions in the supply of chloride, sulphate and other ions to fresh waters from atmospheric precipitation. *Phil. Trans.*, ser. B 247: 147-148.
- GORSHKOVA, T. I. 1956. Humidité naturelle, carbonates et matières organiques des dépôts comme indicateurs des conditions de sédimentation. *Tr. Inst. Océanogr. Acad. Sc. U.R.S.S.*, t. 17.
- HAMILTON, E. L., H. W. MENARD. 1956. Density and porosity of sea floor surface sediment off San Diego, California. *Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull.* 40: 754-761.
- HAARDER, H. 1961. Einbau von Bor in detritische Tonminerale Experimenter zur Erklärung des Borgehaltes toniger Sedimente. *Geoch. Cosm. Acta* 21: 284-294.
- HERSEY, J. B. 1965. Sediments ponding in the deep sea. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 76, 11: 1251-1260.
- HOCHRFUTINER, H. 1881. Analyse du limon du Léman. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 16: 473/149.
- JAAG, O. 1955. La crise des lacs et rivières de l'Europe Centrale. *Bull. Fr. Pisc.* 177: 129-140.
- 1963. Corrélation entre la turbidité, la transparence et la couleur de quelques-unes de nos eaux de surface. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.*, 68, 205.
- , J. BAARS, E. PEARSON. 1965. *Advances in water pollution research*. Ed. Pergamon Press, 1119 pages.
- JAYET, -. 1945. A propos de l'âge du maximum glaciaire quaternaire. *Ecl. Geol. Helv.*, 38, 2: 458-469.
- 1958. Remarques sur la composition, la structure, les déformations mécaniques des moraines glaciaires pléistocènes et actuelles. *Ecl. Geol. Helv.*, 45, 2: 287-293.
- JOUKOWSKY, E. 1920. La formation du Petit-Lac. *C. R. Soc. Phys. Hist. nat. Genève*, vol. 37 (2).
- , J.-P. BUFFLE. 1938. Etude sur la partie occidentale du lac de Genève. *Mém. Soc. Phys. Hist. nat. Genève*, vol. 41, 4: 415-456.
- KREITMAN, L. 1931. Etude des courants du lac Léman. *Les études rhodaniennes*, 7, 2: 109-130.
- 1935. Contribution à l'étude expérimentale des courants lacustres. *Rev. Eaux et Forêts*, août 1935, 11 pages.
- KRUMBEIN, W. C., R. M. GARRELS. 1952. Origin and classification of sediments in terms of pH and oxydo-reduction potentials. *Journ. Geol.* 60: 1-33.
- KUSNETZOV, S. I. 1952. Rol mikroorganismov v krugovosotie vescestv v ozerach. *Izd-vo Akad Nauk S.S.R.*, 300.
- LAMBE, T. W. 1958. The structure of compacted clays. *Soil Mech. and Found. Div. Journ. Am. S.C.E. Proc.*, V. 84, SM2, paper n° 1654, 34 p.
- LEENHARDT, O. 1964. Le mud penetrator. *Bull. Inst. Oceanogr. Monaco*, n° 1303, 44 p.
- 1965. Le sondage sismique continu. *Rev. Géogr. phys.*, VII, 4: 285-294.
- , P. CROUZET. 1965. *Essais comparés du boomer et du sparker*. Rapport Musée Océanogr. Monaco OL/046 (rapport manuscrit).
- LIVINGSTONE, D. A. 1965. Sedimentation and the history of water level changes in lake Tanganika. *Limnol. Oceanogr. USA*, 10, 4: 607-610.
- LOMBARD, Aug. 1939. Influences tectoniques sur le modelé du bassin du Léman. *Bull. Assoc. Géogr. Fr.*, n° 123: 128-137.
- 1939. La géologie des Voirons. *Mém. Soc. Helv. Sc. nat.*, 74.
- 1965. Notice explicative de la feuille « Genève », n° 48, de l'*Atlas géologique de la Suisse* au 1/25.000.

- LOMBARD, Aug. J.-P. VERNET. 1964. Pétrographie sédimentaire dans le massif des Voirons. *Arch. Sc. Genève*, 17, 1.
- , R. DE HALLER. 1964. Trois sondages dans la dépression de la Seymaz. *Arch. Sc. Genève*, 17, 3: 354-356.
- , Y. CUÉNOT. 1965. Sondages et profils dans la rade de Genève. *Arch. Sc. Genève*, 18, 2: 305-320.
- LORIOL, J. P. de. 1962. L'anomalie magnétique du Jorat, son extension sur la côte française du Léman. *Arch. Sc. Genève*, 15, 2: 384-388.
- LUDI, W. 1939. Analyse pollinique des sédiments du lac de Genève. *Mém. Soc. Phys. Hist. nat. Genève*, 41, 5: 467-497.
- LUGEON, M. 1897. Leçon d'ouverture du cours de Géographie physique professé à l'Université de Lausanne. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.*, 33.
- 1934 Le lac Léman. *Guide géol. de la Suisse Exc.*, n° 4, 5: 332-35.
- 1941 Une hypothèse sur l'origine du Jura, *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.*, vol. 61.
- , E. GAGNEBIN. 1941. Observations et vues nouvelles sur la géologie des Préalpes romandes. *Bull. Lab. Géol. Lausanne*, n° 72: 1-84.
- LYNCH, D. L., L. J. COTNOIR. 1956. The influence of the clay minerals on the breakdown of certain organic substrates. *Proc. Soil. Sc. Soc. Amer.* 20: 367-370.
- , M. WRIGHTL, J. COTNOIR. 1956. The adsorption of carbohydrates and related substances on clay minerals. *Proc. Soil Sc. Soc. Amer.* 20, 1: 6-9.
- MACKERETH, F. J. H. 1966. Some chemical observations on postglacial lake sediments. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 765, 250: 165-213.
- MEADE, R. H. 1961. Compaction of montmorillonite rich sediments in Wester Fresno County. Art. 324 in *US Geol. Survey prof.*, paper 424-B: D 89-D 92.
- MEDLIN, W. L. 1959. Thermoluminescent properties of calcite. *Journ. Chem. Phys. USA*, 30, 2: 451-458.
- MERCANTON, P.-L., E. WANNER. 1943. Die magnetische anomalie im Jorat. *Ann. der Schweiz Meteo Zentralanstalt*.
- MERCIER, P., L. PUSZTASZERI, J.-P. VERNET. 1965. Morphologie sous-lacustre au large de Saint-Prex. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.*, 318, 69.
- MERING, J. 1946. The hydration of montmorillonite. *Trans. Farad. Soc.*, 42, B. 205.
- 1964. Gonflement, dispersion et hydratation des argiles. *Bull. Gr. fr. Argiles*, 14, 9: 115-125.
- MERMIER, E. 1923. Sur l'existence de gorges préwürmiennes dans le Mormont (Vaud). *Bull. Géol. Lausanne*, n° 33.
- MEYER DE STADELHOFFEN, C. 1964. Note préliminaire au sujet de l'étude géoélectrique de la plaine du Rhône. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.*, 134, 68.
- MINDER, L. 1922. Studien über den Sauerstoffgehalt des Zürichsees. *Arch. für Hydrobiol.*, 3.
- MITCHELL, J. K. 1960. *The application of colloidal theory to the compressibility of clays* in R. H. G. Parry ed. *Interparticle forces in clay-water-electrolyte systems*, Melbourne, Commonwealth Sc. and Ind. Res. Organiz., pp. 2.92-2.97.
- MORTIMER, Ch. 1942. The exchange of dissolved substances between mud and water. *Journ. Ecology* 30: 147-201.
- 1949. Seasonal changes in chemical conditions near the mud surface in two lakes of the English lake district. *Verh. Inter. Verein Limnol.* 10: 353-356.
- 1956. The oxygen content of air saturated freshwaters and aids in calculating percentage saturation. *Mitt. Inter. Ver. Limnol.* 6: 20 p.
- NORRISH, K. 1954. The swelling of montmorillonite. *Faraday Soc. London, Discussions* 18: 120-134.
- NOVEL, E. 1941. Richesse en bactéries de quelques échantillons d'eau du lac Léman prélevées en profondeur. *Rev. d'Hydrobiol.*, 9, 1/2: 77-80.
- 1960. De quelques études bactériologiques des eaux du Léman prélevées dans le Petit-Lac durant les années 1957-58-59. *Rev. suisse d'Hydrol.* 22, 1: 271-280.
- NYGAARD, G. 1955. On the productivity of five danish waters. *Verh. Inst. Limnol.* 12: 123-133.
- PAREJAS, E. 1929. *L'épaisseur des varves dans le Haut-Lac de Genève*. 3^e Congrès du Rhône.
- POLDINI, E. 1963. Les anomalies gravifiques du canton de Genève. *Mat. pour la Géol. Suisse*, n° 4,
- PRINSHEIM, P. 1928. *Fluoreszenz und Phosphoreszenz*. Springer, Berlin.

- RATCLIFFE, E. H. 1960. The thermal conductivity of ocean sediments. *Journ. Geophys. Research* 65: 1535-1541.
- RICHARDS, A. F. 1962. *Investigations of deep sea sediment cores. II. Mass physical properties*. Report of the US Navy Hydrographic Office. TR. 106, 146p.
- RIGASSI, D. 1957. Faune sanoisienne du Pont-de-Naves, H.-S. *Arch. Sc. Genève*, 10/2: 171-184.
- RITTENBERG, S. C. 1940. Bacteriological analysis of some long cores of marine sediments. *J. Mar. Res.* 3, 3: 191-201.
- RODHE, W. 1958. Primärproduktion und see typen. *Verh. Int. Ver. Limnol.* 13: 121-141.
- 1958. The primary production in lakes: some results and restriction of the ^{14}C method. *Rapp. Con. Int. Expl. Mer.* 144: 122-128.
- ROMIEUX, J. 1930. Les carbonates dans les sédiments du lac de Genève. *Arch. Sc. Phys. et Nat. Genève*, 5^e pér. 12/3/4: 202-232.
- RYAN, W. B. F., F. WORKUM Jr. and J. B. HERSEY. 1965. Sediments of the Tyrrhenian Abyssal plain. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 76: 1261-1282.
- SAUVAGE, J., C. SERRUYA. 1964. Au sujet de la présence d'un Dryas dans les sédiments du lac Léman. *C. R. Acad. Sc. Paris* 259: 3310-3313.
- SCHROEDER, J. W. 1958. Géologie du pays de Genève. Mém. Soc. Géogr. Genève, *Globe*, t. XCVII.
- SEIBOLT, E. 1956. Wasser Kalk und Korngrossen Verteilung. *Neues Jahrbuch f. Geol. Paleont. Montsh.*, 10.
- SERRUYA, C. 1965. Quelques données nouvelles sur la structure profonde du lac Léman. *Arch. Sc. Genève*, 18, 1: 108-113.
- 1965. Note sur la diagenèse primaire dans les sédiments du lac Léman. *Arch. Sc. Genève* 18, 3: 672-676.
- , J. SAUVAGE. 1966. Stratigraphie postglaciaire des sédiments du lac Léman. *C. R. Acad. Sc. Paris*, n° 24, série D: 2397-2400.
- , O. LEENHARDT, L. GLANGEAUD. 1966. Structure et évolution postoligocène de la région du lac Léman (France et Suisse). *C. R. Acad. Sc. Paris* 259: 1752-1755.
- , L. PICARD and G. V. CHILLINGARIAN. 1967. Possible role of electrical currents and potentials during diagenesis (electrodiagenesis). *Journal Sed. Petrol.*, June 1967, pp. 695-698.
- et VERGNAUD-GRAZZINI. 1967. Evolution paléoclimatologique des sédiments du lac Léman. *Arch. des Sciences*, 19, 2, pp. 197-210.
- , O. LEENHARDT, Aug. LOMBARD. 1967. Etudes géophysiques dans le lac Léman. Interprétation géologique. *Arch. Sc. Genève*, 19, 2, pp. 179-196.
- , S. SERRUYA. 1966. L'influence des conditions thermiques et biochimiques sur la sédimentation lacustre: diagenèse primaire des différents types de sédiments. *Rev. Géogr. Alp fr.*, 54, 1: 113-129.
- SERRUYA S. 1966. Rapport de la D.G.R.S.T. *Convention 63 FR 177*. (rapport manuscript).
- , M. ROMANENS et A. ORAND. 1965. Aperçu des relations entre la chimie des eaux et la sédimentation dans le lac de Nantua (Ain). *Bull. Fr. Pisciculture*, n° 218: 5-10.
- , P. VIVIER et A. ORAND. 1966. Effets de quelques facteurs externes sur la thermique du lac de Nantua. Symposium de Garda, public. n° 70 de l'A.I.H.S., pp. 371-382.
- SERVICE FÉDÉRAL DES EAUX. *Annuaires hydrographiques de la Suisse*.
- SHAPIRO, J. 1957. Chemical and biological studies on the yellow organic acids of lake water. *Limnol. Oceanogr.*, 11, 3: 161-179.
- 1960. The cause of a metalimnic minimum of dissolved oxygen. *Limnol. Oceanogr.*, 5, 2: 216-227.
- SHOSTAKOVICH, V. B. 1931. Die Bedeutung der Untersuchung der Bodenablaufungen der Seen für einige Fragen der Geophysik. *Intern. Verbandstheor. Angew. Limnol. Verh. Stuttgart*, 5 307-317.
- 1934. Mud deposits in lakes and the periodic fluctuation phenomena in nature. *Zapiski State Hydrol. Inst.* 13: 95-138.
- STEEMAN NIELSEN, E. 1952. The use of radioactive carbon for measuring organic production in the sea. *Journ. Cons. Inter. Explor. Mer*, XVIII, 2.

- STEEMAN NIELSEN, E. 1959. Untersuchungen über die Primärproduktion des Plankton in einigen Alpenseen Österreichs. *Oikos Acta Oecologica Scandinavia*, 10, 1.
- TERZAGHI, K. 1955. Influence of geological factors on the engineering properties of sediments. *Econ. Geol.*, 50th Annivers., vol. 50-55: 557-618.
- THOMAS, E. A. 1955. Über die Bedeutung der Abwasser bedingten direkten Sauerstoffzehrung in Seen. *Monatbull. Schweiz Ver. Gas und Wasser fachm.* 5: 119-129.
- TOURTELLOT, H. A. 1964. Minor element composition and organic carbon content of the late cretaceous age in the western interior of the United States. *Geoch. Cosm. Acta*, vol. 28, n° 10: 1579-1604.
- TRASK, P. D. 1932. *The origin and environment of source sediments of petroleum*. Houston, Texas, 323 p.
- TRUMPY, R., A. BERSIER. 1954. Les éléments des conglomérats oligocènes du Mont-Pèlerin. *Ecl. Geol. Helv.*, 47, 1: 120-163.
- VALLENTYNE, J. R. 1957. Carotenoids in a 20,000 year old sediment from Searles Lake, California. *Arch. Biochem. Biophys.*, 70, n° 1, 29-33.
- 1963. Geochemistry of carbohydrates. *Inter. Ser. Monogr. Earth Sci. G.B.* 16: 455-502.
- Y. S. SWABEY. 1955. A reinvestigation of the history of lower Linsley Pond, Connecticut. *Am. Journ. Sci.* 253: 313-340.
- , J. R. WHITAKER. 1956. On the presence of free sugars in filtrered lake water. *Science* 124: 1026-1027.
- VAN ANDEL, T. H., POSTMA, H. 1954. Recent sediments of the Gulf of Paria, Venezuela and Trinidad. *Verh. K. Acad. Wetensch. Afd. Natuurk.* 1,20, 5: 1-245.
- VERNET, J. P. 1957. Sur quelques argiles glaciaires de la région lémanique. *Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne*, n° 121: 1-11.
- 1958. Etudes sédimentologiques et pétrographiques des formations tertiaires et quaternaires de la partie occidentale du plateau suisse. *Eclog. Geol. Helv.*, 51, 3: 1115-1152.
- 1964. Pétrographie sédimentaire dans la molasse d'Yverdon. *Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne*, n° 149: 1-12.
- 1966. Prises de vues sous-lacustres dans le Léman lors de plongées du mésoscaphe « Auguste Piccard ». *Bull. Lab. Lausanne*, n° 164, 6 p.
- VILLARET, P., M. BURRI. 1965. Les découvertes palynologiques de Vidy et leur signification pour l'histoire du lac Léman. *Bull. Lab. Géol. Lausanne*, n° 153: 1-19.
- VIVIER, P. 1944. Température et oxygène dissous dans le Léman français. *C. R. Somm. Séances Soc. Biol.*, 182, 4 p.
- et S. SERRUYA. 1966. La pollution organique dans le lac de Nantua. *L'Eau*, 53, n° 4, pp. 167-171.
- WAKSMAN, S. A. 1933. On the distribution of organic matter in the sea bottom and the chemical nature and origin of marine humus. *Soil Sc.* 36: 125-147.
- WARKENTIN, B. P., R. K. SCHOFIELD. 1960. Swelling pressures of dilute Na-montmorillonite pastes in *Swineford*, Ada ed., *Clays and clay minerals*, New York, Pergamon Press, 7th Nal Congr. on Clays and clay minerals Proceedings: 343-349.
- WORZEL, J. L. 1959. Extensive deep sea sub bottom reflections identified as white ash. *Nal Acad. Sci. Proc.* 45: 349-355.
- ZAVARINA, N. B. 1955. Studies of causes inhibiting the growth of microorganisms in the body of the silt deposits in lake Biserovo. *Mikrobiol.*, 24, 5: 573-579.
- ZELLER, E. 1954. Thermoluminescence of carbonate sediments. *Nucl. Geol.*, edited by H. Faul, New York, John Wiley and sons Inc., pp. 180-188.
- ZOBELL, C. E. 1946. Studies on redox potential of marine sediments. *Bull. Amer. Assoc. Petr. Geol.* 30, 4: 477-513.
- , S. C. RITTENBERG. 1948. Sulfate reducing bacteria in marine sediments. *Journ. Mar. Res.* 7: 602-617.
- , R. Y. MORITA. 1959. Deep sea bacteria. *Galathea Report Copenhagen* 1: 139-154.

LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Carte d'ensemble du bassin versant du Lac Léman.
2. Corrélation entre la charge en suspension et les débits liquides du Rhône.
3. Courbes de température sur la transversale Thonon-Rolle pour l'année 1965.
4. Courbes du taux de saturation en Oxygène.
- 5a. Courbes de productivité primaire en fonction de la profondeur.
- 5b. Variations de la productivité primaire au cours de l'année.
6. Carte des isochrones de la molasse.
7. Emplacement des carottes et des principaux profils.
- 8 à 17. Profils de carottage.
18. Profil granulométrique et courbes de thermoluminescence de la calcite de la carotte L44.
19. Périodicités enregistrées dans les varves.
20. Corrélation entre le Carbone organique et l'Azote des sédiments.
21. Teneur en eau, potentiel redox, densité, optique des sédiments en fonction de la bathymétrie.
22. Corrélation entre la teneur en eau et le pouvoir réducteur des sédiments.
23. Évolution du rapport teneur en eau/carbone organique avec la profondeur.
24. Variation de la densité du sédiment frais en fonction de la teneur en eau et de la porosité.
25. Courbe d'absorption γ de la carotte L 49.
26. Variation de la pression interstitielle des vases.
27. Courbes de déshydratation comparées des vases du Léman et de différentes argiles.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau I. Les teneurs en CO₂ au cours de l'année.
- II. La productivité primaire organique en fonction de la profondeur.
- III. Teneur en K et en Th des sédiments.
- IV. Valeurs du pouvoir réducteur des sédiments actuels.
- V. Les éléments traces dans les sédiments actuels.
- VI. Les éléments traces dans la série tardi et postglaciaire.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
Préavis	125
Avant-propos (Aug. Lombard)	125
Préface	126
Introduction	128
Première partie: LE BASSIN D'ALIMENTATION DU LÉMAN	131
Chapitre I. <i>Caractéristiques du bassin et origine de matériaux détritiques</i>	131
Chapitre II. <i>Débits liquides et solides des principaux affluents du Léman</i>	132
Deuxième partie: LE MILIEU LACUSTRE	134
Chapitre I. <i>Caractères physiques</i>	134
A. Transparence et photométrie	134
B. Température	135
Chapitre II. <i>Caractères chimiques</i>	136
A. Substances minérales	136
B. Gaz dissous	136
1. Oxygène	136
2. Gaz carbonique	141
Chapitre III. <i>Caractères biologiques: la productivité primaire</i>	144
A. Méthode de mesure	144
B. Résultats	144
1. Productivité en fonction de la profondeur	144
2. Variation de la productivité au cours de l'année	147
3. Production globale	149
4. Comparaison avec les résultats d'autres auteurs	149
Troisième partie: SOCLE MOLASSIQUE ET COUVERTURE SÉDIMENTAIRE	150
Chapitre I. <i>Technologie</i>	150
Chapitre II. <i>Résultats du sondage sismique continu</i>	152
Chapitre III. <i>Résultats comparés du sondeur de vase et des carottages. La stratigraphie des sédiments postglaciaires</i>	155
Chapitre IV. <i>Caractéristiques de la sédimentation postglaciaire</i>	181
A. Le carbonate de calcium des sédiments	181
1. Teneur en CO_3Ca	181
2. L'origine du CO_3Ca des sédiments	182
3. Les informations données par la thermoluminescence	182
4. Les informations données par la composition isotopique de l'oxygène et du carbone des carbonates	186
B. La répartition des sédiments	186
C. La vitesse de sédimentation	187
D. Les périodicités enregistrées dans les varves	189

	Pages
Quatrième partie: LES FACIÈS EN RELATION AVEC LE MILIEU DE DÉPÔT	191
Chapitre I. <i>Variations de quelques facteurs chimiques dans les différents faciès des sédiments lémaniques</i>	191
A. Le pouvoir réducteur des sédiments	191
1. Le P.R. le long des carottes	191
2. Le P.R. dans les sédiments actuels	193
B. L'azote	194
C. La relation C/N (P.R./N)	194
D. Les sulfures	195
Chapitre II. <i>Etude bactériologique de quelques profils</i>	197
A. Prélèvement	197
B. Résultats	197
Chapitre III. <i>Le potentiel d'oxydo-réduction du milieu de dépôt</i>	198
A. Notion de potentiel d'oxydo-réduction	198
B. Résultats	199
Chapitre IV. <i>La dynamique des liaisons entre le milieu et le dépôt sédimentaire</i>	202
A. Influence des variations saisonnières de la productivité et formation des varves d'oxydo-réduction	202
B. Influence des variations climatiques de différents ordres	203
C. Influence de la vitesse de sédimentation	204
Chapitre V. <i>Les éléments traces</i>	204
A. Les éléments traces dans les sédiments actuels	205
1. Le Léman	205
a) Différences de concentration	205
b) Comparaison avec les teneurs mesurées dans d'autres séries sédimentaires lacustres	207
2. Lac de Nantua	207
a) Concentrations comparées des différents niveaux	207
b) Valeurs absolues et comparaison avec les teneurs d'autres séries lacustres	207
3. Résultats	208
a) Valeurs absolues des teneurs	208
b) Répartition des éléments traces en fonction de la bathymétrie	209
B. Les éléments traces dans les sédiments postglaciaires du Léman	209
1. Principales caractéristiques	213
2. Détails des mesures	213
3. Conclusions	214
Cinquième partie: QUELQUES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SÉDIMENTS	215
Chapitre I. <i>Teneur en eau</i>	215
A. Résultat global	216
B. Teneur en eau et granulométrie	216

	Pages
C. Teneur en eau et matière organique	216
1. Rapport eau/carbone	218
2. Rôle des oxydations dans le départ de l'eau	219
3. Sédimentation expérimentale	220
D. La teneur en eau et l'âge des sédiments	222
E. La teneur en eau et la pression des sédiments sus-jacents	223
F. La teneur en eau et la vitesse de sédimentation	223
Conclusion	224
Chapitre II. <i>La densité</i>	224
A. La densité au pycnomètre	225
1. Variation de la densité avec la teneur en eau	225
2. Variation de la densité avec la profondeur	226
B. Variation de la densité par absorption γ le long d'une carotte	226
Chapitre III. <i>La limite de liquidité</i>	229
A. Variation de la limite de liquidité en fonction de la profondeur	229
B. Les teneurs en eau des vases superficielles par rapport à la limite de liquidité	230
Chapitre IV: <i>La pression interstitielle dans les vases</i>	230
A. Principe de la mesure par capteur de pression	230
B. Description de l'appareillage	231
C. Mise en place	231
D. Résultats	231
Chapitre V: <i>Propriétés électrochimiques des vases</i>	234
A. Expérience préliminaire	234
B. Expérience au laboratoire	234
Chapitre VI. <i>La liaison eau-vase à l'échelle du cristallite d'argile</i>	236
Sixième partie: RECHERCHES MÉTHODOLOGIQUES POUR L'ÉTUDE DES SYSTÈMES LIMNOLOGIQUES ET SÉDIMENTAIRES	239
<i>Les problèmes technologiques de mesure</i>	239
<i>Les problèmes méthodologiques</i>	241
<i>Méthode permettant de conduire l'analyse</i>	243
Bibliographie	244
Liste des figures	251
Liste des tableaux	251
Table des matières	252