Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Band: 71 (1971-1973)

Heft: 337

Artikel: Introduction à l'étude des relations chimiques entre les sédiments du fond et l'eau du Léman

Autor: Gonet, Olivier

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-276294

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: 02.07.2025

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

Introduction à l'étude des relations chimiques entre les sédiments du fond et l'eau du Léman *

PAR

OLIVIER GONET
Dr ès Sciences

Abstract

The chemical reactions which take place between the highly unstable sediments deposited on the bottom of the Lake of Geneva and the liquid environment, are partly responsible for the ever more rapid « eutrophisation » of the lake.

PRÉAMBULE

Les travaux de recherche présentés dans ce texte ont été financés par le Fonds national de la Recherche scientifique. Ils ont été exécutés dans le cadre du Laboratoire d'Hydrologie de l'Institut de Géologie de l'Université de Lausanne, en étroite collaboration avec le Dr R. Monod du Laboratoire cantonal.

Par ces quelques lignes, l'auteur remercie très vivement le professeur H. Badoux et le Dr A. Ramuz, qui ont collaboré à la direction des recherches, le Dr P. Mercier, qui a réalisé les campagnes de topographie sous-lacustres, le Dr P. Ravussin, de la maison Alcyon électronique, qui a conçu et mis au point les appareils de mesures géoélectriques sous-lacustres et le turbidimètre portatif, MM. D. Howald et H. Gehri, qui ont eu la responsabilité des plongées sous-lacustres et M. Rouge, de l'Aérodrome de Prangins, qui a dirigé l'exécution des photographies aériennes.

I. LE PROBLÈME

L'eutrophisation du Léman n'est pas uniforme sur toute son étendue. Certaines régions paraissent nettement plus atteintes que d'autres. Mais, contrairement à ce que l'on pourrait croire, il n'y a pas toujours de relations évidentes entre cet état d'eutrophisation et la quantité de matières

* Publié avec l'aide du Fonds F. A. Forel de la SVSN.

fertilisantes déversées par les rivières et les ruissellements des régions riveraines.

Nous avons mesuré, par exemple (O. GONET, 1971), que dans la zone comprise entre le « Grand » et le « Petit » lac, le phytoplancton se développe en plus grande abondance au large de la côte française qu'au large de la côte suisse. Etant donné la différence dans la densité de la population et l'activité de ces deux rives du lac, ce résultat est inattendu. Peut-être est-il lié aux courants provoqués par la sortie du Rhône à Genève. Il a en tout cas de nombreuses conséquences sur l'interprétation des phénomènes limnologiques de la région.

En approfondissant son étude, nous avons été amené à envisager différentes hypothèses de travail. L'une d'elles se rapportait aux relations chimiques entre l'eau du lac et les sédiments superficiels du fond.

Il est bien connu que ces relations existent. Par la chute des organismes planctoniques morts, les sédiments superficiels s'enrichissent en matières organiques. L'intense activité bactérienne dont ces sédiments sont le siège, tend à reminéraliser certains produits fertilisants apportés sous forme organique et à les remettre en solution dans l'eau d'imbibition. Lorsque, sous l'effet des courants par exemple, la surface du sol sous-lacustre est remise en suspension, les produits fertilisants qu'il contient sont libérés dans l'eau du lac où ils serviront à l'alimentation d'une nouvelle génération planctonique.

A partir de cette donnée, il fallait se demander si le phénomène n'agissait pas de manière plus active dans certaines régions sous-lacustres. Cela pouvait éventuellement apporter une explication satisfaisante à ces différences dans l'état d'eutrophisation du lac.

Très vite, le problème s'est révélé d'une très grande complexité. Comme il n'avait jamais fait l'objet de recherches systématiques dans le Léman, il fallut commencer par mettre clairement en évidence les mécanismes qui président aux remises en suspension et à lui seul, cet aspect partiel du problème nous a occupé pendant plusieurs années.

Ce sont les résultats obtenus sur ce point jusqu'à présent qui forment le sujet de cette publication préliminaire.

II. LA RÉGION ÉTUDIÉE

En déversant dans le lac Léman des quantités considérables de matériaux détritiques, la Promenthouse a constitué, au cours des âges, un grand delta qui empiète de plus d'un kilomètre carré sur le domaine du lac.

La partie émergée de ce delta est peu habitée, généralement boisée de pins, de hêtres et de peupliers. Le long du lac, le rivage est muré sur la moitié environ de sa longueur, le reste est en plages de sable ou de galets.

Pour ce qui est de la rivière, son bassin d'alimentation est d'environ 100 km². Il ne s'y trouve ni barrage, ni grande ville. L'activité de la région est presque exclusivement agricole, seule la petite ville de Gland peut être considérée comme partiellement industrielle.

Le débit de la Promenthouse est de l'ordre de 800 à 1000 l/s en plein été. Il atteint 2000 à 5000 l/s au printemps. Normalement, la rivière déverse dans le lac 200 à 300 mg de phosphates par seconde, mais suivant les précipitations atmosphériques, cet apport peut monter jusqu'à 1000 ou 1500 mg/s.

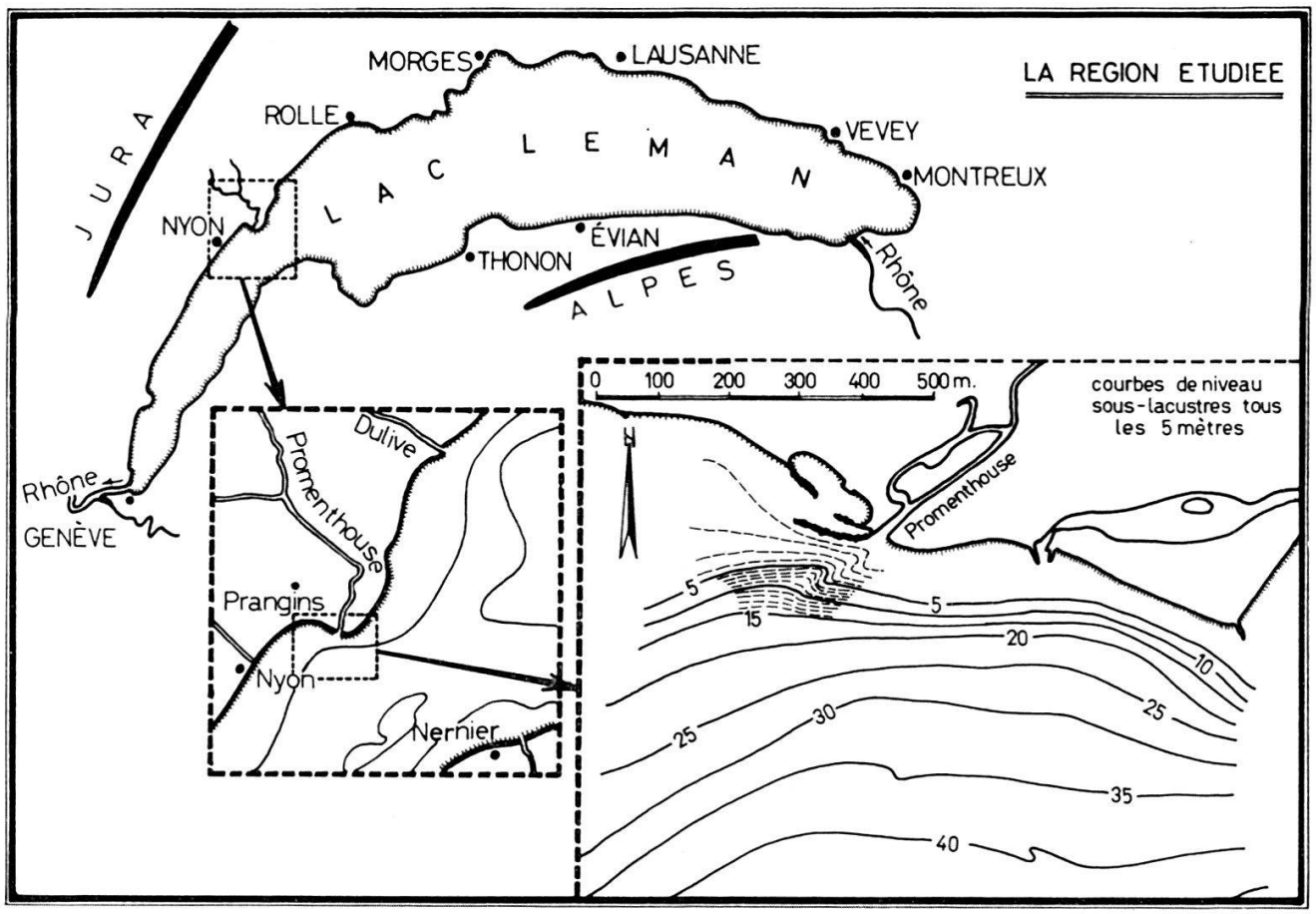


Fig. 1. — La région étudiée et sa topographie sous-lacustre.

III. La topographie sous-lacustre de la région

Une carte topographique sous-lacustre de la zone sud du delta a été établie en utilisant un échos-sondeur enregistreur, monté sur un bateau à moteur dont les déplacements furent repérés par trois théodolites installés sur le rivage.

La morphologie sous-lacustre du delta ne révèle d'ailleurs pas de surprises particulières. Une sorte de plateau, la « Beine » de 50 à 100 m de largeur et de 2 ou 3 m de profondeur, longe le rivage. En direction du

large, il est limité par une assez brusque rupture de pente. C'est le sommet du « Mont » qui s'enfonce ensuite jusqu'à 15 ou 20 m de profondeur. Plus au large encore, la pente diminue progressivement pour prendre peu à peu l'inclinaison naturelle du fond du lac.

Le seul accident topographique un peu important se trouve à l'embouchure de la rivière : le cours d'eau se prolonge au fond du lac par une petite vallée de 1 à 2 m de creux, de 20 à 30 m de largeur et de 150 m de longueur environ.

A partir de 12 m de profondeur, les formes de cette petite vallée sous-lacustre s'estompent, puis elle disparaît assez brusquement.

Au large, à 300 ou 400 m du rivage, l'échos-sondeur révèle la présence de quelques petits monticules de 1 ou 2 m de hauteur maximum. Ils se marquent très nettement sur un fond qui par ailleurs est très plat et très monotone. Pour identifier ces petits reliefs, nous avons plongé sur plusieurs d'entre eux ; chaque fois, nous n'avons trouvé que les restes de vieux arbres, probablement arrachés par les orages, tombés dans le lac, descendus sur les pentes du Mont pour ne s'arrêter définitivement qu'assez loin du rivage.

III. La nature des dépôts superficiels sous-lacustres

Une étude sédimentologique de la partie occidentale du Léman a été publiée par E. Joukowsky et J. Ph. Buffle en 1938. Ce travail, devenu classique, décrit la variation des dépôts lacustres sur une grande épaisseur. Etant donnés les objectifs de nos recherches, il fallut compléter cette documentation par une étude plus détaillée de la couche tout à fait superficielle du fond du lac, celle qui est en contact direct avec l'eau, les quelques centimètres ou dizaines de centimètres d'épaisseur de sous-sol qui sont susceptibles d'être remis en suspension par les vagues ou les courants.

Du fait de sa variabilité, il s'agit là d'un domaine fort difficile à étudier. Nous l'avons abordé par le moyen de différentes méthodes dont certaines sont nouvelles et qu'il convient de décrire rapidement.

a) *La méthode géoélectrique*

Sur terre ferme, la méthode de prospection géoélectrique est bien connue. On l'utilise, en particulier, pour l'étude des terrains Quaternaires. Son principe est basé sur le fait que les différents types de matériaux du sous-sol sont caractérisés par leur résistivité électrique.

Normalement, pour mesurer cette résistivité, on ferme un circuit électrique par la terre au moyen de deux électrodes A et B. Le courant s'écoule dans le demi-espace souterrain et crée, par chute ohmique, des différences de potentiel. En mesurant l'intensité I du courant émis ainsi

que la différence de potentiel ΔV entre deux électrodes auxiliaires M et N, la résistivité apparente ρ_a du sous-sol se calcule facilement :

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

où K est un facteur qui dépend des dimensions du dispositif de mesure.

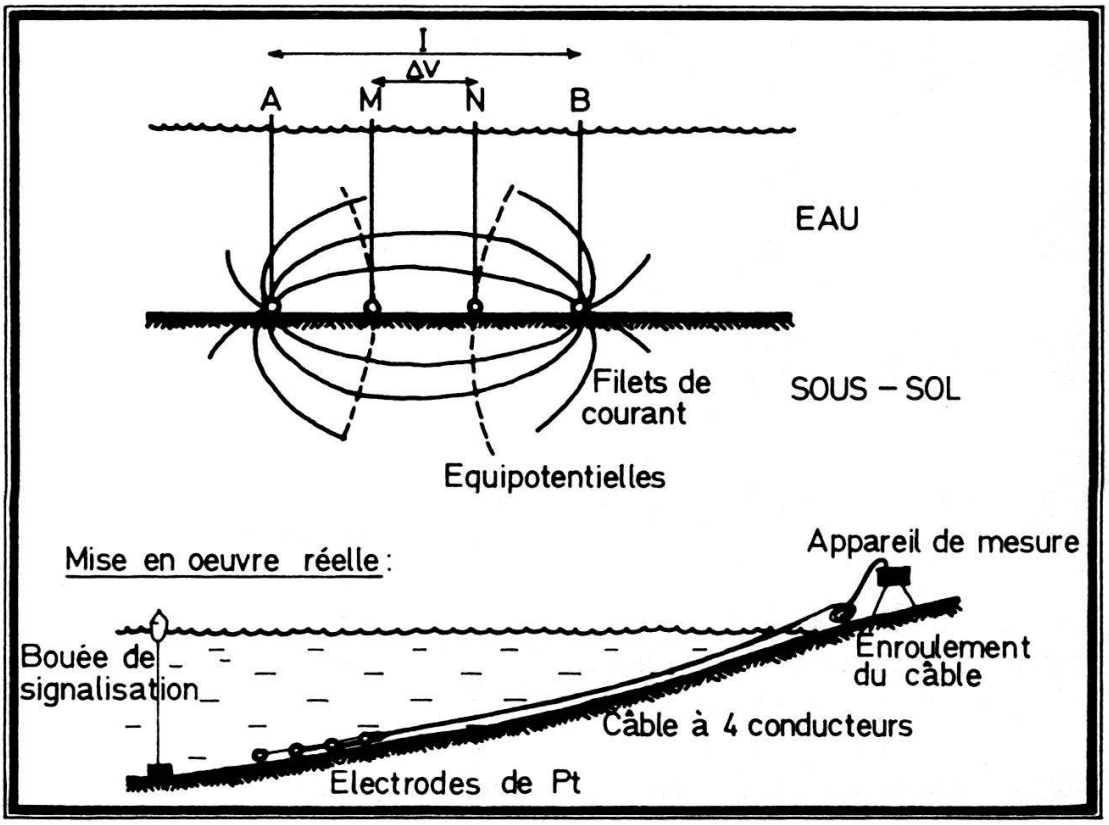


Fig. 2. — La méthode géoélectrique et sa mise en œuvre dans le lac.

En milieu sous-lacustre, le problème se complique quelque peu : en laissant les électrodes ABMN traîner sur le fond, une partie du courant I s'écoule dans le demi-espace occupé par l'eau du lac.

Comme dans notre cas, il s'agissait de se limiter à l'exploration de la couche de sous-sol tout à fait superficielle, la longueur d'émission de courant électrique AB a pu être limitée à 30 cm. Donc, pour la quasi-totalité des mesures, cette longueur d'émission était négligeable par rapport à la profondeur de l'eau. En effet, on calcule facilement qu'en terrain homogène, la profondeur de pénétration de la majeure partie des filets de courant n'est pas très grande. La moitié d'entre eux environ se concentrent dans une tranche de terrain égale au quart de la longueur d'émission. C'est dire que pour toutes les mesures sous-lacustres exécutées au-delà de 15 ou 20 cm d'eau, l'erreur introduite sur le résultat des mesures par la présence de cette eau peut être calculée de manière simplifiée.

Il faut tenir compte des éléments suivants :

— de la résistivité électrique de l'eau (à l'intérieur des marges d'erreur admissibles, on peut la considérer comme étant constante) ;

— du contraste entre la résistivité apparente mesurée et celle de l'eau (c'est le seul élément du calcul qui varie d'une mesure à l'autre et qu'il faut considérer indépendamment) ;

— du rapport profondeur de l'eau/dimensions du dispositif (il est presque toujours très grand et peut être considéré comme constant).

Après avoir traité le résultat brut des mesures selon ce plan de calcul très simple, on obtient un ensemble de données géoélectriques telles qu'elles se présenteraient en l'absence de l'eau du lac, l'humidité du sous-sol restant inchangée.

Comme toujours en limnologie, le repérage topographique précis des mesures pose des problèmes délicats. Pour les résoudre, une série de bouées furent mouillées à 500 m au large et à 100 m les unes des autres, puis repérées par triangulation au théodolite. Une autre série de points de repères, également déterminés au théodolite, furent marqués à la peinture sur le rivage. Et c'est à l'intérieur de ce réseau serré et bien visible de loin que se sont faites toutes les mesures.

L'appareil lui-même restait sur le rivage. Un bateau à moteur déroulait, en le halant vers une bouée du large, un long câble de 400 m contenant les quatre fils conducteurs qui reliaient les électrodes de platine et l'appareil de mesure.

Les mesures, en courant alternatif, se faisaient ensuite tous les 5 m, en réenroulant le câble qui traînait la sonde sur le fond.

En exécutant ainsi les mesures entre chaque point du rivage et toutes les bouées, on obtient finalement une série de profils géoélectriques que l'on peut reporter sur la carte topographique et qui, en se recoupant les uns les autres, permettent de nombreuses vérifications et finalement assurent une très grande qualité de précision et de fiabilité à l'ensemble de la carte.

L'interprétation sédimentologique d'une carte géoélectrique sous-lacustre est toujours une opération délicate. La résistivité ne représente, en effet, qu'une information rudimentaire sur la nature du sous-sol. D'autant plus qu'à certains égards, elle est indirecte puisqu'elle dépend non seulement du sédiment lui-même, mais aussi de la quantité et de la nature des sels dissous dans l'eau d'imbibition.

Néanmoins, et à condition de procéder à de nombreuses vérifications sur des échantillons prélevés dans la région étudiée, on peut considérer que les zones dont la résistivité électrique est élevée (plus de 100 ohms-m) se trouvent recouvertes de matériaux à granulométrie grossière tels que

sables ou galets, alors que celles de résistivité plus basse correspondent aux matériaux fins : argiles, limons, etc.

Sur cette base schématique, la carte géoélectrique peut être utilisée avantageusement pour extrapoler sur de grandes surfaces les observations ponctuelles qu'il faut faire en plongée.

Le long du rivage, sur la Beine, jusqu'à 2 ou 3 m de profondeur, ne se trouvent que des sables et galets « propres », c'est-à-dire sans matériaux fins. Ils sont régulièrement brassés et nettoyés par le mouvement continuel des vagues.

La limite de ce type de sol est représentée approximativement sur la carte géoélectrique par la courbe des équirésistivités 120 ohms-m.

A partir du sommet du mont, en direction du large, l'aspect du fond change. La profondeur est déjà trop grande pour que l'influence des vagues se fasse sentir directement. Le sol est recouvert d'une pâte qui semble assez lourde et dans laquelle sont mélangés des matériaux fins, à forte teneur organique (parfois jusqu'à 15 %) et des sables et galets. Sur la pente, on observe parfois, en plongée, des petits arcs de déchirure révélant que l'ensemble est en position instable.

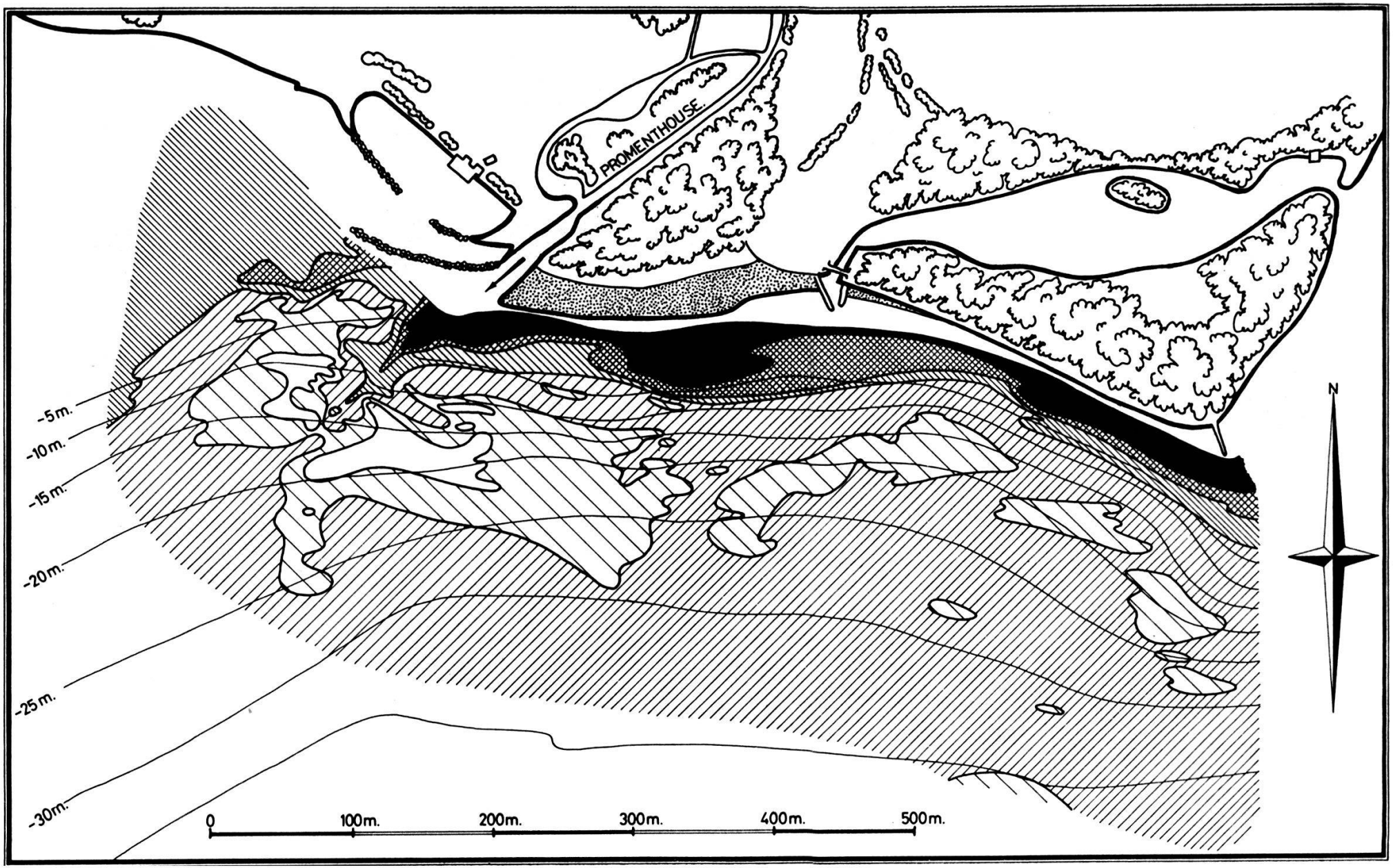
Naturellement, dans ces zones situées à moins de 6 ou 8 m de profondeur, les observations directes aussi bien que les mesures géoélectriques ne sont possibles qu'en hiver ou au printemps. Plus tard dans la saison, le sol se recouvre d'une végétation plus ou moins abondante de macrophytes qui empêche tout travail.

Au-delà de 15 ou 20 m de profondeur, l'inclinaison du sol diminue jusqu'à donner au plongeur l'impression d'un fond parfaitement horizontal. Depuis le pied du mont jusqu'à 100 ou 200 m plus au large, se trouve une accumulation assez étendue de matériaux fins qui se marquent sur la carte géoélectrique par des résistivités particulièrement basses (moins de 30 ohms-m).

Il faut avoir vu, en plongée, ces dépôts à leur place naturelle pour se faire une idée objective de leur comportement dans l'eau. Au premier abord, la surface semble solide. Il s'y dessine, par endroits, de curieux polygones de la taille d'une assiette. Leur fond est plat, noirâtre, ils sont entourés d'une petite crête brunâtre (oxydée) de 1 cm de hauteur environ. Il suffit d'effleurer légèrement ce sol de la main pour qu'un nuage noir de plusieurs mètres cubes se soulève avec une étonnante facilité.

Lorsque le plongeur dépasse cette zone de dépôt pour explorer le large, l'aspect du sol ne change guère. A peine devient-il un peu moins sensible au toucher, encore plus monotone aussi. Une vaste plaine parsemée de quelques vieux troncs d'arbres à moitié enfouis dans la vase.

Les résistivités mesurées dans cette région sont extrêmement monotones, 60 ohms-m partout. L'appareil de mesure n'enregistre plus les petites variations de résistivité, caractéristiques des zones précédentes. (Ces petites variations sont trop faibles et intéressent de trop petites sur-


PROMENTHOUSE
-5m.
-10m.
-15m.
-20m.
-25m.
-30m.
0
100m.
200m.
300m.
400m.
500m.
N

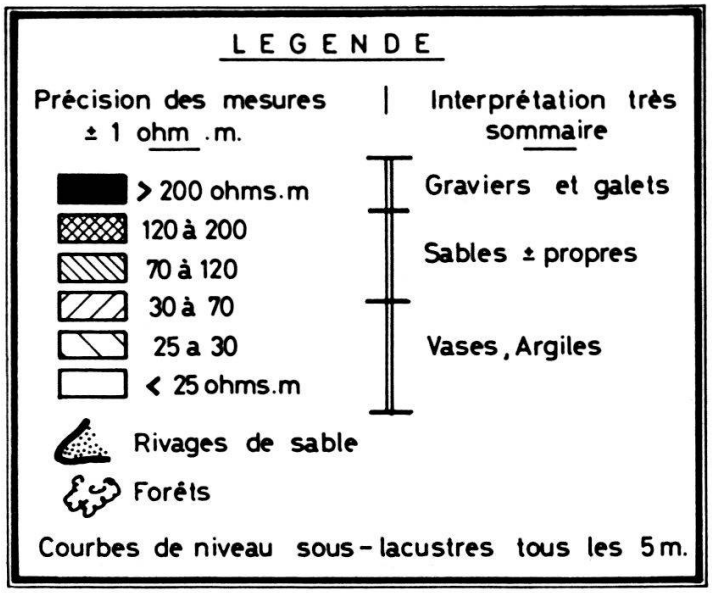


Fig. 3. — Carte géoélectrique détaillée de la zone sous-lacustre située au large de l'embouchure de la Promenthouse.

Longueur d'émission AB = 30 cm (ce qui correspond approximativement à une profondeur d'investigation de 10 cm dans le sous-sol).

Les courbes d'équirésistivité tracées sur cette carte sont basées sur 1370 mesures ponctuelles réparties sur l'ensemble de la zone hachurée.

(Relevé topographique sous-lacustre exécuté sous la direction du Dr P. MERCIER.)

---

faces, moins de 1 m², pour être représentées sur une carte à cette échelle.)

A l'embouchure de la rivière, la disposition des différents dépôts se complique quelque peu.

A certaines occasions, le courant de la rivière continue de couler sur le fond, jusqu'à 150 m au large, environ. Cette arrivée provoque naturellement des perturbations dans la masse d'eau lacustre. Par réaction, des sortes de tourbillons à vitesse lente remontent la pente de part et d'autre du courant principal. Celui-ci est assez rapide pour remettre en suspension les matériaux fins qui se déposent normalement au fond de la petite vallée ou qui sont apportés par l'eau de la rivière elle-même. En revanche, les tourbillons de retour sont assez lents pour que ces matériaux fins et légers puissent se déposer et s'accumuler sur les deux flancs de cette vallée sous-lacustre. Là, ils contribuent à l'accentuation de son relief.

Les observations directes en plongée confirment tout à fait cette description : le fond de la vallée est à dominante graveleuse ou sableuse, les deux dépôts accumulés sur ses flancs sont constitués de feuilles plus ou moins pourries, amenées par la rivière puis mélangées à du sable très fin et à de la vase.

En fait, ce phénomène d'érosion sous-lacustre n'agit qu'assez rarement.

En règle générale, le mélange entre les deux eaux s'opère à l'embouchure de la rivière elle-même, dès que son lit s'élargit pour s'ouvrir sur le lac. Les mesures de température et de conductivité électrique de l'eau le montrent à l'évidence.

Cependant, à l'occasion des crues exceptionnelles ou au printemps, il arrive que le contraste de densité entre l'eau du lac et celle de la rivière alourdie de matières en suspension soit suffisant pour former une petite bataillère (FOREL, 1892) à quelques dizaines de mètres au large de l'embouchure.

Il est alors assez impressionnant de voir par transparence à travers l'eau claire du lac l'ensemble du phénomène en action, y compris la remontée de gros nuages boueux, de part et d'autre du courant principal.

* * *

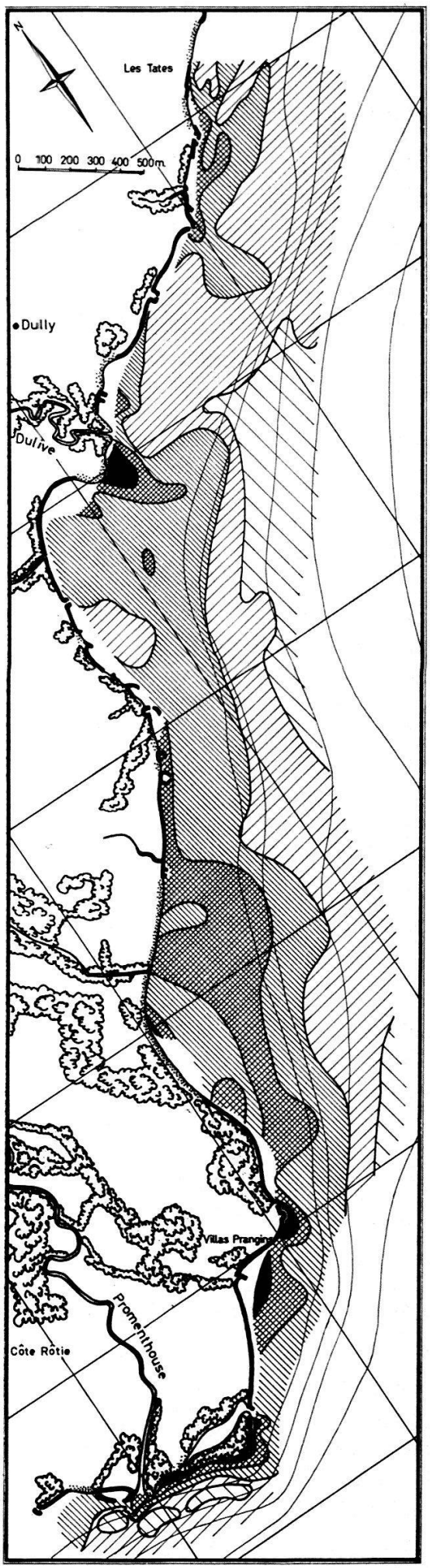
Avant de pouvoir tirer des conclusions d'intérêt général sur la base de ce document, il fallait procéder à des mesures semblables dans des régions plus variées. Aussi avons-nous étendu nos investigations le long de la côte, en direction du nord-est, sur environ 6 km. (Fig. 4.)

Cette figure est beaucoup moins détaillée que la précédente. Cependant, on y retrouve approximativement la même distribution générale des dépôts : les sédiments grossiers se trouvent plutôt près des rivages alors que ceux à granulométrie plus fine ont été transportés plus au large et particulièrement au pied du mont. Mais il y a de nombreuses anomalies et exceptions à ce schéma. Il faut y voir probablement le premier indice d'un phénomène que, plus loin, nous aurons l'occasion d'observer « in situ ». Il s'agit de la migration des sédiments déposés entre 0 et 30 m de profondeur.

A la belle saison, le lac est stratifié verticalement, tandis qu'horizontalement il peut être considéré comme étant à peu près homogène. On devrait donc s'attendre à ce que les dépôts qui s'y forment (argiles, débris organiques, plancton mort, etc.) se présentent en une couche de vase homogène, sauf à proximité de l'embouchure des rivières. Or, ce n'est pas le cas ainsi que le montrent clairement les cartes de résistivité.

Nous pensons que les anomalies capricieuses qui s'y dessinent ne s'expliquent bien que par l'action des courants.

Au premier abord, cette interprétation peut sembler d'importance secondaire. Il n'en est rien, le phénomène a des conséquences très importantes sur la vie du lac. Aussi, avant de les examiner, convient-il de confirmer l'existence de ces migrations par le moyen d'autres méthodes d'observation.



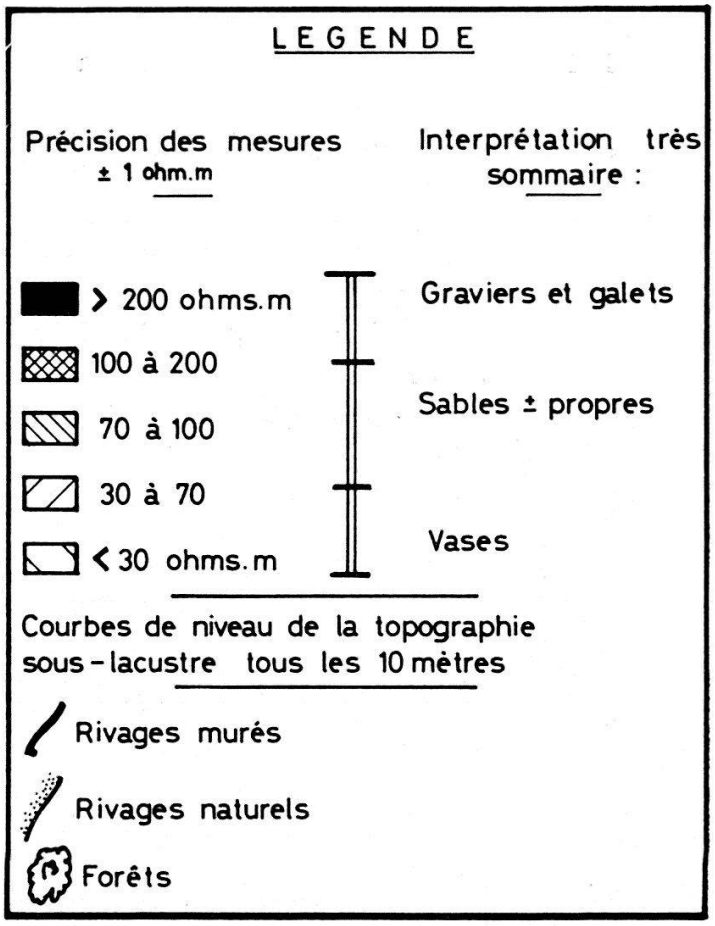


Fig. 4. — Carte de synthèse de l'ensemble des mesures géoélectriques effectuées dans la zone des deltas de la Promenthouse et de la Dulive.

Longueur d'émission AB = 30 cm.

Les formes des courbes d'équirésistivité représentées sur cette carte sont schématisées.

b) *Le prélèvement des échantillons de sédiments fins sous-lacustres*

L'un des résultats les plus avantageux d'une campagne géoélectrique est de désigner les points où l'on pourra prélever les échantillons les plus représentatifs : au cœur des anomalies tout d'abord, puis dans les différentes zones qui semblent particulièrement intéressantes. On ne plonge plus au hasard n'importe où.

Le prélèvement lui-même doit être exécuté très soigneusement. Il faut obtenir des échantillons intacts, c'est-à-dire ayant conservé la totalité de leur eau interstitielle et la totalité de la fraction fine du sédiment.

Pour exécuter cette opération dans les meilleures conditions, nous avons utilisé un cylindre de 5 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur, dans lequel coulisse un piston.

Le prélèvement lui-même s'effectue en plongée : après avoir choisi la zone à échantillonner sur la base des indications de la carte géoélectrique, le plongeur explore les quelques mètres carrés avoisinants. Il observe les éventuelles particularités morphologiques de la surface, choisit le point le plus représentatif. Il y dépose délicatement le cylindre en position verticale, le piston bas. Puis, il l'enfonce dans le sol, le piston restant posé sur la surface où il empêche toute remise en suspension ou tout mélange avec l'eau du lac. A partir de 10 cm de profondeur, un dispositif très simple permet de fermer le bas du cylindre enfoncé et de détacher la carotte intacte.

c) *Les analyses chimiques*

La composition chimique des sédiments superficiels n'est pas constante au cours de l'année. Elle évolue avec la nature et la quantité des apports solides, elle dépend aussi de l'activité bactérienne qui, elle-même, varie en fonction des caractéristiques physico-chimiques de l'eau du lac avec laquelle le sédiment est en contact. Autrement dit, le résultat de l'analyse chimique d'un échantillon n'est représentatif de l'état du sol sous-lacustre que pour un moment donné, ce qui en complique l'interprétation.

Au cours de cette étude, nous avons exécuté une quinzaine de ces analyses sur des sédiments prélevés à différentes profondeurs et à différentes saisons. Les résultats moyens figurent au tableau suivant :

Résultat moyen de 15 analyses de sédiments superficiels
en % de la matière sèche

Matières organiques	9,6 %	(suivant les échantillons, elle varie entre 6 et 12 %)
Perte au feu (CO_2)	18,9 %	(variable de 15 à 23 %)
Silice et insoluble	38,1 %	(variable de 31 à 46 %)
Chaux (CaO)	21,5 %	(variable de 16 à 27 %)

Magnésie (MgO)	1,2 %	(variable de 1,1 à 1,4 %)
Carbonate de chaux	40,4 %	(variable de 30 à 50 %)
Fer (Fe_2O_3)	2,6 %	(variable de 1,9 à 3 %)
Alumine (Al_2O_3)	6,3 %	(variable de 5,6 à 7 %)
Manganèse (MnO)	0,03 %	(variable de 0,02 à 0,05 %)
Sulfates (SO_3)	0,4 %	(variable de 0,2 à 0,6 %)
Phosphore total (P_2O_3)	0,4 %	(variable de 0,3 à 0,5 %)
Azote organique (N)	0,6 %	(variable de 0,4 à 1,2 %)

d) *Les analyses granulométriques*

La granulométrie des sédiments dépend moins de l'activité des bactéries. De plus, elle est généralement considérée comme ayant une grande influence sur la résistivité. Le résultat de l'analyse granulométrique d'un échantillon est donc plus facile à interpréter que celui de son analyse chimique.

Il importait de choisir un procédé d'analyse simple et d'une exécution relativement rapide. En effet, et quelle que soit la méthode utilisée, les mesures granulométriques sur la fraction très fine des sédiments sont toujours d'une précision assez discutable. Par mesure de précaution élémentaire, il est donc avantageux de pouvoir les répéter et de n'en considérer que les résultats moyens.

Pour tenir compte de cette exigence, nous avons procédé de la manière suivante :

— Tamisage à sec de la fraction supérieure à 100 μ.

— Tamisage à sec de la fraction comprise entre 50 μ et 100 μ (afin d'avoir une vérification partielle sur la suite de l'analyse).

— Application de la méthode américaine du densimètre pour tout ce qui est inférieur à 100 μ.

Cette dernière technique est basée sur la loi de Stokes. Elle consiste à mesurer la diminution de la densité apparente d'un litre d'eau distillée dans laquelle on a longuement mélangé 30 grammes de sédiments secs. A mesure que le temps passe, la suspension se dépose au fond du récipient en commençant par ses éléments les plus lourds, les plus gros et les plus hydrodynamiques. La densité du mélange diminue en fonction du temps et on la mesure avec un aréomètre de précision. Puis, grâce à la loi de Stokes, on exprime la courbe obtenue en termes de diamètres des particules. Naturellement, un ensemble de précautions assez strictes doivent entourer les opérations : la température doit rester constante, il faut utiliser les mêmes appareils, le même récipient pour toutes les analyses dont il faudra comparer les résultats, etc.

Malgré cela, la méthode reste fort approximative parce que, d'une part, la loi de Stokes ne s'applique exactement qu'à des particules sphériques, ce qui n'est pas le cas pour la majorité des sédiments lacustres ;

d'autre part, la densité des particules est loin d'être constante à l'intérieur des catégories considérées.

Mais l'intérêt principal de ces mesures granulométriques est de pouvoir comparer les échantillons entre eux. D'ailleurs, dans le cadre de certaines interprétations, la valeur de la méthode n'est guère discutable puisqu'elle est basée sur la loi de Stokes, comme la sédimentation elle-même des particules sur le fond du lac : il est évident que, dans un courant chargé de matières en suspension, les éléments à chute rapide, qu'ils soient sphériques ou non, seront déposés les premiers et plus on s'éloignera de la source, plus les dépôts seront constitués de particules à chute lente.

En réalité, les différences entre les résultats de ces analyses ne sont pas très importantes. Apparemment, les échantillons se répartissent en deux groupes :

— ceux représentés typiquement en C. Ils contiennent en assez grande abondance des particules de 30 à 50 μ de diamètre théorique ;

— ceux représentés par l'échantillon F, contenant des particules un peu plus fines, entre 10 et 30 μ de diamètre théorique.

La limite entre ces deux catégories est assez floue. Il arrive même qu'elles soient toutes deux représentées dans le même échantillon ; c'est le cas, par exemple, en A et en B.

Si on reporte maintenant ces résultats sur la carte topographique, on met facilement en évidence un schéma de répartition des dépôts qui paraît systématique et d'ailleurs logique :

Sur les pentes du mont ou, plus généralement, près des rivages, les particules relativement grossières dominent. Au pied du mont, en revanche, elles sont plus fines. Plus au large encore, des éléments à chute un peu plus rapide se retrouvent bien représentés.

Malgré les restrictions qu'imposent les imperfections de la méthode d'analyse, deux conclusions méritent d'être proposées :

1) Dans l'état actuel des recherches, il apparaît que les mesures de résistivité électrique sont liées à la granulométrie des dépôts. Mais, il est encore impossible de savoir s'il s'agit là d'une coïncidence, d'une liaison indirecte par le détour de l'état chimique des eaux interstitielles ou s'il faut vraiment voir là l'effet de la fraction solide.

2) D'après les lois élémentaires de la sédimentologie, il semble que les dépôts ont pour le moins deux origines différentes : l'une relativement proche, la rivière, les rivages, ils sont grossiers près du bord et très fins au pied du mont ; l'autre lointaine et indéterminable, les matériaux étant apportés par les courants après avoir subi différents grano-

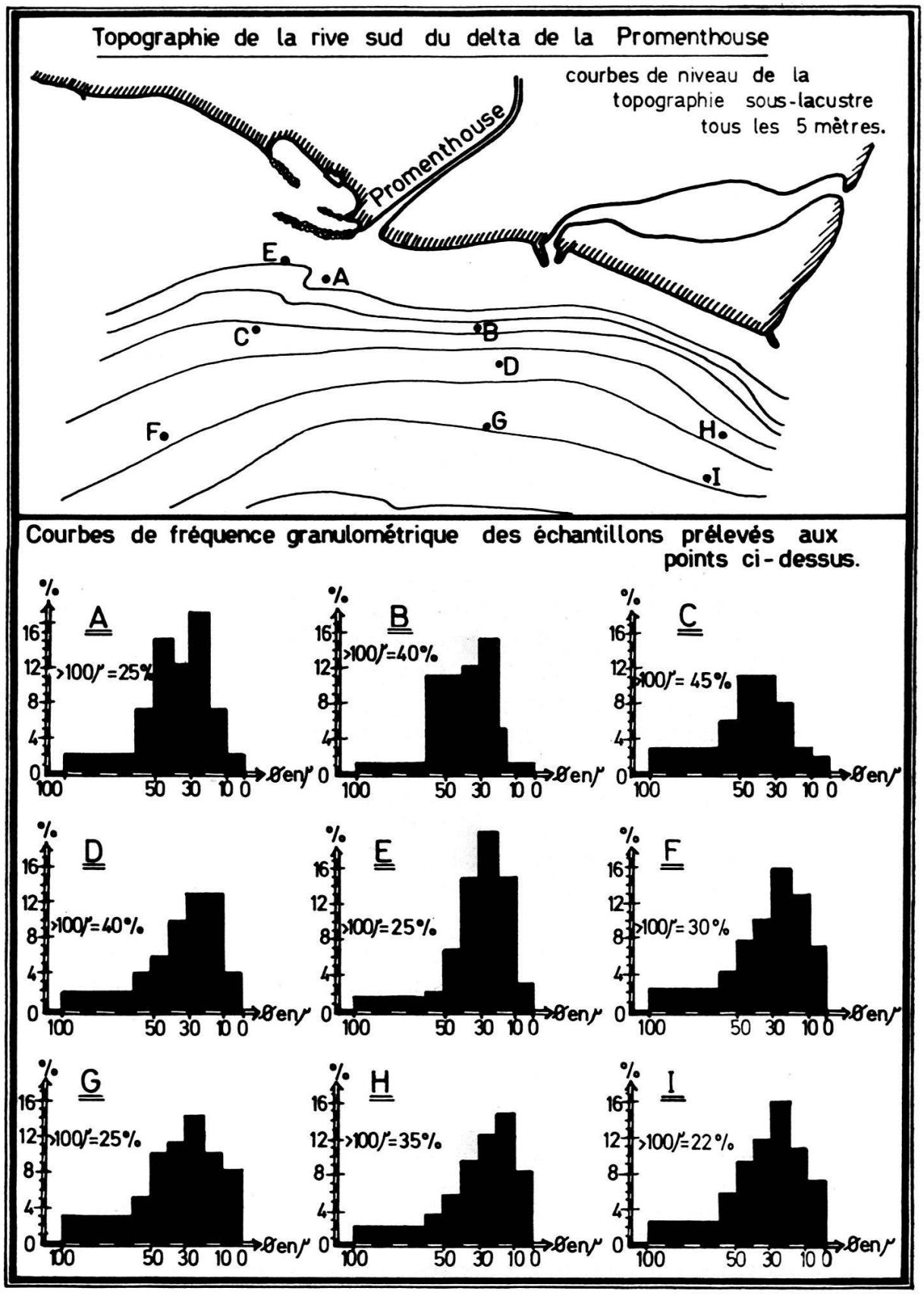


Fig. 5. — Quelques résultats significatifs des analyses granulométriques de sédiments superficiels du fond du lac.

classements moins faciles à reconstituer. Dans la région étudiée ici, ces derniers constituent les dépôts du large.

Cette seconde conclusion est importante, elle rejoint celle déduite des cartes géoélectriques et laisse supposer l'existence de mouvements de migration des sédiments superficiels. Il convient donc d'aborder maintenant le sujet par des méthodes d'observation directes.

V. La migration des dépôts superficiels sous-lacustres

Certains jours, l'eau du lac paraît étonnamment claire et transparente au plongeur. Même par 30 ou 40 mètres de profondeur, la lumière reste suffisante pour lui permettre de travailler et d'observer le sol sous-lacustre sans le secours d'un éclairage artificiel. Il arrive aussi assez souvent qu'en quelques heures tout s'obscurcisse au point que même en allumant un phare puissant, il ne puisse voir le bout de son bras tendu. Un épais brouillard de matières en suspension se détache du fond et s'éloigne de la pente en direction du large.

Parfois ce brouillard traverse les stratifications thermiques de l'eau pour s'écouler lentement vers la profondeur. Mais à vrai dire, nous n'avons jamais assisté à la formation d'un véritable courant de turbidité assez violent pour mériter ce nom. D'ailleurs, les rares traces qui, à la rigueur, pourraient être interprétées comme étant dues à l'érosion des courants de turbidité sont, dans la région, beaucoup trop modestes pour révéler l'existence d'un phénomène fréquent ou important.

Il arrive aussi que par le hasard des courants, sans doute, ces nuages turbides atteignent la surface du lac. C'est alors que se dégage cette affreuse odeur de pourriture trop connue des riverains.

De manière générale, en tout cas, l'existence de phénomènes capables de remettre les sédiments superficiels du lac en suspension est évidente pour le plongeur. Mais, comme la durée de ses séjours sous l'eau est forcément brève, ses observations ne peuvent être qu'incomplètes. C'est pourquoi nous avons approfondi le problème en exécutant des mesures physiques à partir de la surface.

Pour ce faire, différentes méthodes ont été mises en œuvre.

a) *Les mesures de la transparence de l'eau*

Une autre manière très directe d'observer les remises en suspension des sédiments superficiels du fond du lac consiste à mesurer la transparence de l'eau, pendant un certain temps et à quelques jours d'intervalle.

Dans ce but, nous avons développé, en collaboration avec la maison Alcyon électronique de Lausanne, un appareil capable de mesurer avec

précision cette transparence « in situ », à n'importe quelle profondeur et indépendamment de la lumière du jour.

La description détaillée de cet appareil et de ses performances fera l'objet d'une autre publication, mais pour la clarté de ce texte, disons que du bateau on descend dans l'eau une sonde reliée à l'appareil de mesure par un câble et qu'au fur et à mesure de sa descente, on mesure en continu la transparence.

L'appareillage est étalonné d'après les conventions suivantes :

100 % = transparence de l'air ;

0 % = opacité totale.

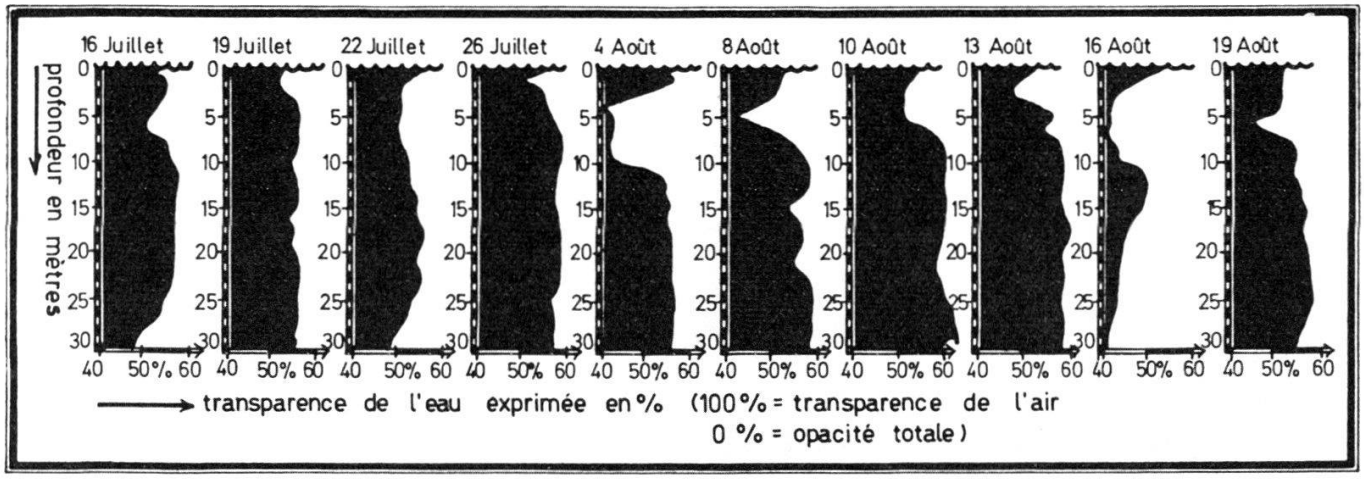


Fig. 6. — Variations de la transparence de l'eau du lac, mesurée « in situ » tous les mètres de profondeur, au large du delta de la Promenthouse, à différentes dates de l'été 1970.

Trois causes principales sont susceptibles de faire varier la transparence de l'eau :

— Le phytoplancton coloré.

— Le zooplancton (dans une moindre mesure, parce qu'il est souvent plus ou moins translucide).

— Les matières opaques en suspension.

A vrai dire, il n'est pas toujours facile de distinguer les deux premières causes de la dernière. En première analyse, on peut considérer que le plancton se concentre relativement près de la surface et particulièrement dans la zone comprise entre 2 et 10 m de profondeur, alors que les matières solides en suspension seront plus dispersées, avec une tendance à augmenter vers la profondeur, près du sol sous-lacustre.

Cette base d'interprétation approximative suffit pour examiner la figure.

En bref, on y découvre trois sortes d'anomalies susceptibles d'être attribuées aux suspensions inertes :

— Certaines couches d'eau peu épaisses et situées à mi-profondeur se marquent par une brusque diminution de la transparence. Celle-ci peut être due soit à la présence d'un nuage de zooplancton, soit à une turbidité formée quelque part sur la pente du rivage et déplacée vers le large par un courant (par exemple le 8 août à 15 m et à 21 m de profondeur).

— Une couche d'eau troublée, de plusieurs mètres d'épaisseur se trouve parfois située près du fond (par exemple le 16 juillet, le 22 juillet, le 19 août).

— D'autres fois, c'est la transparence de la colonne d'eau sur toute sa hauteur qui diminue (par exemple le 16 août).

On peut certainement attribuer les troubles de l'eau constatés dans les deux derniers de ces cas, au moins, à l'effet des remises en suspension de sédiments superficiels.

Une fois de plus, l'existence de ces phénomènes se trouve confirmée.

b) *Les trappes à sédiments*

Dans le but de préciser quelque peu l'ampleur du phénomène de la migration des sédiments, nous avons installé sur le fond du lac des « trappes à sédiments » (aux points I, II et III de la carte topographique de la figure 1).

Il s'agit de trois batteries de quatre trappes chacune, disposées par 30 m de profondeur.

Chaque batterie est installée sur un tapis de linoléum de 4 m^2, solidement fixé sur le sol sous-lacustre. Ce tapis est destiné premièrement à empêcher que les plongeurs ne remettent de la vase en suspension au moment de la pose des trappes à sédiments, deuxièmement à observer l'évolution des dépôts sur une surface placée dans les mêmes conditions que le sol lui-même.

A quelque distance du tapis se trouve un corps-mort relié à une bouée de signalisation. En utilisant une corde de plus faible densité que l'eau, on évite qu'elle ne traîne sur le fond en agitant la vase.

Sur chacun des trois tapis sont posées quatre marmites cylindriques et sans couvercle (en aluminium, de 20 cm de hauteur et de 24 cm de diamètre). Elles sont lestées de quelques kilos de plomb, pour éviter que les courants ne les renversent.

Semblables à des cuves de pluviomètres, elles sont destinées à recevoir et à conserver tout ce qui tombe de l'eau.

Quatre de ces marmites par batterie, donc 12 en tout, ont été déposées vides sur les tapis, au fond du lac, au mois d'avril 1969.

Trois mois plus tard, en juillet, une marmite par batterie a été délicatement prélevée et remontée à la surface. Pendant cette courte période, une couche de 1 ½ cm environ de matériaux fins s'était déposée au fond de chacune d'elles.

Trois mois plus tard encore, en septembre, un second prélèvement de marmites montrait que la quantité de matériaux déposés avait nettement augmenté. Leur épaisseur était de l'ordre de 2 cm.

Au mois de février 1970, après 10 mois passés au fond du lac, les marmites contenaient une couche de sédiments variant entre 8 et 15 cm.

Au mois d'avril, après une année entière de séjour, certaines marmites s'étaient entièrement remplies et se trouvaient enfouies dans la vase, d'autres au contraire n'avaient guère changé de contenu depuis les prélèvements de février.

Nous préciserons plus loin la quantité et la qualité de ces différents dépôts. Mais, en attendant, ces indications préliminaires suffisent à montrer l'importance quantitative des remises en suspension et des migrations de sédiments superficiels. En effet, il est bien évident qu'une pareille quantité de matériaux ne peut provenir des seules précipitations chimiques et biologiques d'une couche d'eau de 30 m d'épaisseur.

Il est également injustifiable d'attribuer une telle intensité de sédimentation aux apports de la petite rivière et ceci pour trois bonnes raisons :

— La batterie de marmites la plus proche de l'embouchure se trouvait tout de même à une distance de 460 m. La plus éloignée se situait à plus d'un km de l'axe d'écoulement de la rivière.

— Pendant tout l'été, l'eau de la Promenthouse est claire et limpide. Or, pendant la même période, 2 cm d'épaisseur de sédiment ont pu se déposer au fond des marmites et ceci à plusieurs centaines de mètres au large.

— On pourra constater plus loin qu'il n'y a pas de relation bien évidente entre la quantité de matériaux déposée dans les marmites et la distance qui les séparait de l'embouchure de la rivière.

Il faut donc admettre que ces marmites ont surtout récolté des sédiments apportés par les courants sous-lacustres et cette conclusion est confirmée par toutes les observations décrites plus haut.

Chaque fois que le sol est remis en suspension, les matériaux fins sont transportés à des distances qui doivent être considérables puisque, lorsqu'on imite le phénomène en agitant de la vase dans un récipient plein d'eau, il faut ensuite plusieurs jours de tranquillité pour que tout se redépose sur le fond et que l'eau redevienne claire. Or, il n'est pas rare de mesurer des courants dont la vitesse est de l'ordre de 1 à 2 km/h (BÉTANT et PERRENOUD, 1933).

Dans ces conditions, on peut penser que si les marmites se remplissent aussi rapidement, c'est qu'elles retiennent tout ce qui tombe dedans. Sur le sol lui-même, en revanche, les matériaux déposés lors d'un ralentissement du courant sont ensuite repris, transportés plus loin et remplacés par d'autres, dès que la vitesse du courant diminue à nouveau.

Par comparaison avec l'épaisseur des dépôts qui ont recouvert peu à peu les tapis de linoléum sur lesquels étaient déposées les marmites, on peut estimer très approximativement que le sol est ainsi régulièrement « labouré » sur une épaisseur d'au moins 10 cm.

Naturellement, ces observations et cette estimation ne sont valables que pour la zone du delta de la Promenthouse. A considérer la carte géoélectrique des régions avoisinantes et les formes très capricieuses des anomalies électriques, on se représente objectivement la très grande variété des conditions dans lesquelles se trouve placé le sol sous-lacustre à l'égard des phénomènes susceptibles de le remettre en suspension.

On mesure par là combien il serait oiseux de généraliser ces observations localisées à l'ensemble d'une région du lac.

VI. Quelques conséquences des remises en suspension

a) *Les dépôts varvés*

Il est bien connu qu'en prélevant dans le sous-sol lacustre une carotte intacte de sédiments, on observe très souvent dans sa coupe une alternance de matériaux gris foncé et gris clair. C'est ce qu'on appelle les varves.

F. A. Forel et, après lui de nombreux auteurs, expliquent cette alternance par le caractère saisonnier de la sédimentation : en hiver, les rivières apportent les matériaux gris foncé, à dominante calcaire ; en été, ce sont surtout des grains de quartz, feldspaths mêlés à des micas et à des minéraux lourds, l'ensemble étant de couleur plus claire.

Il est arrivé très souvent que les échantillons prélevés dans la zone sud du delta présentent ce genre de stratification. Mais l'interprétation classique que l'on en donne paraît, dans cette région, peu vraisemblable :

Elle est absolument incompatible avec l'existence de ces mouvements, de ces mélanges continuels qui brassent les sédiments superficiels et démolissent les éventuelles structures saisonnières.

A considérer d'autre part le modeste cours de la Promenthouse ou des petites rivières avoisinantes en été, il paraît incroyable qu'elles puissent influencer la nature des dépôts sur une surface aussi étendue.

L'existence de ces varves dans la région pourrait s'expliquer de manière plus satisfaisante par le mécanisme lui-même de la remise en

suspension et du dépôt des matériaux sous-lacustres : si, dans un récipient plein d'eau, on disperse un échantillon quelconque de sédiment lacustre, les particules les plus lourdes, les plus hydrodynamiques et les plus grosses retombent les premières. Elles sont presque toujours à dominante claire ; ce sont les quartz, les feldspaths, etc. Ensuite viennent les particules plus fines et plus légères, généralement de couleur plus sombre.

On obtient ainsi une stratification correspondant tout à fait à la description d'une varve.

Certaines zones, pour une raison ou pour une autre, sont protégées de l'effet des courants. Alors, les varves s'y accumulent les unes au-dessus des autres, au gré des variations dans la vitesse des courants. Ailleurs, au contraire, il y a érosion et disparition des dépôts varvés.

C'est dire que la méthode très commune qui consiste à estimer l'âge d'un dépôt en comptant le nombre de ses varves devrait être utilisée avec la plus grande prudence. Tout indique, par exemple, que son application dans la région décrite ici n'aurait aucune signification.

b) *Remise en solution de certains produits chimiques*

Nous en arrivons là au cœur du problème qui nous occupe. Mais, dans l'état actuel des recherches, il n'est pas encore possible de se livrer à une estimation quantitative du phénomène. Tout au plus peut-on essayer d'en démontrer l'existence.

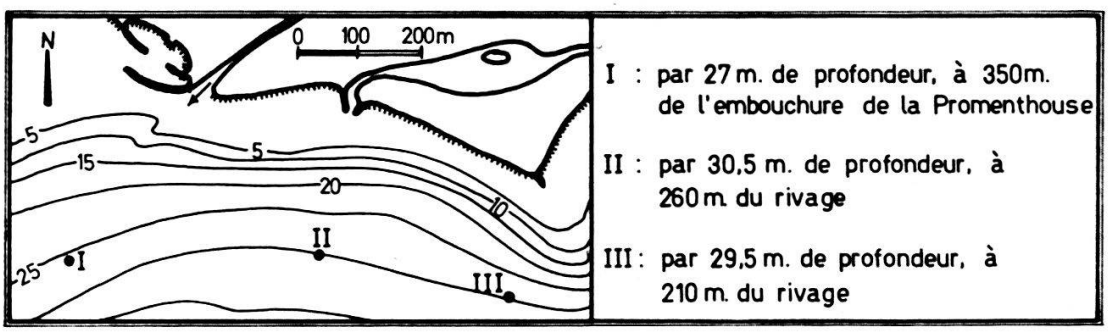


Fig. 7. — Emplacement des récipients déposés au fond du lac, destinés à recueillir et à conserver les sédiments alochtones.

Une première méthode consiste à comparer le résultat des analyses chimiques exécutées sur les sédiments recueillis par des marmites ayant séjourné à différentes périodes de l'année au fond du lac.

Il faut constater, sur la base de ces résultats, que certains éléments diminuent de concentration au cours de leur séjour au fond de l'eau.

EMPLACEMENT I SUR LA FIGURE 7

Durée et période du séjour dans l'eau		du 27 avril 1969 au 16 juillet 1969 3 mois d'été	du 27 avril 1969 au 1er nov. 1969 6 mois d'été	du 27 avril 1969 au 28 février 1970 10 mois été, hiver	du 17 juillet 1969 au 1er nov. 1969 4 mois automne	du 2 nov. 1969 au 28 février 1970 4 mois d'hiver
Quantité de matière sèche		2199 gr/m²	2591 gr/m²	11 867 gr/m²	985 gr/m²	9390 gr/m²
Matière organique	en %	10,4	8,5	10,5	10,8	11,1
Perte au feu (CO_2)	en %	15,0	17,1	15,5	20,7	14,7
Silice et insoluble	en %	45,0	43,7	45,0	32,2	45,9
Chaux (CaO)	en %	17,5	19,6	16,9	23,6	16,1
Magnésie (MgO)	en %	1,3	1,1	1,4	1,3	1,4
$CaCO_3$	en %	32,5	36,5	32,4	44,3	30,9
Fer (Fe_2O_3)	en %	3,1	2,6	2,8	2,6	2,9
Alumine (Al_2O_3)	en %	5,7	6,1	6,7	7,0	6,5
Manganèse (MnO)	en %	0,03	0,03	0,05	0,03	0,05
Sulfates (SO_3)	en %	0,5	0,45	0,25	0,5	0,2
Phosphore total (P_2O_5)	en %	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
Azote organique (N)	en %	0,5	0,4	0,5	0,6	0,5

Analyses exécutées par le Dr R. Monod.

EMPLACEMENT II SUR LA FIGURE 7

Durée et période du séjour dans l'eau		du 27 avril 1969 au 16 juillet 1969 3 mois d'été	du 27 avril 1969 au 1er nov. 1969 6 mois d'été	du 27 avril 1969 au 28 février 1970 10 mois été, hiver	du 17 juillet 1969 au 1er nov. 1969 4 mois automne	du 2 nov. 1969 au 28 février 1970 4 mois d'hiver
Quantité de matière sèche		1318 gr/m²	1456,5 gr/m²	9911 gr/m²	536,5 gr/m²	8057 gr/m²
Matière organique	en %	12,3	10,1	6,9	9,9	6,0
Perte au feu (CO_2)	en %	18,2	21,2	18,0	23,2	18,0
Silice et insoluble	en %	35,8	31,9	43,5	28,3	45,3
Chaux (CaO)	en %	20,2	24,9	20,0	27,3	19,7
Magnésie (MgO)	en %	1,3	1,3	1,4	1,2	1,3
$CaCO_3$	en %	38,3	46,1	38,0	50,5	37,7
Fer (Fe_2O_3)	en %	3,0	2,6	2,5	2,6	2,3
Alumine (Al_2O_3)	en %	6,8	6,3	6,2	6,0	6,0
Manganèse (MnO)	en %	0,03	0,03	0,04	0,03	0,05
Sulfates (SO_3)	en %	0,6	0,6	0,2	0,6	0,2
Phosphore total (P_2O_5)	en %	0,4	0,4	0,3	0,5	0,3
Azote organique (N)	en %	1,2	0,6	0,3	0,7	0,4

Analyses exécutées par le Dr R. Monod.

EMPLACEMENT III SUR LA FIGURE 7

Durée et période du séjour dans l'eau		du 27 avril 1969 au 16 juillet 1969 3 mois d'été	du 27 avril 1969 au 1er nov. 1969 6 mois d'été	du 27 avril 1969 au 28 février 1970 10 mois été, hiver	du 17 juillet 1969 au 1er nov. 1969 4 mois automne	du 2 nov. 1969 au 28 février 1970 4 mois d'hiver
Quantité de matière sèche		1647 gr/m²	2954 gr/m²	10 310 gr/m²	1076 gr/m²	8936 gr/m²
Matière organique	en %	11,2	9,0	7,2	8,4	6,2
Perte au feu (CO_2)	en %	19,3	22,3	18,7	22,9	18,5
Silice et insoluble	en %	35,8	31,9	40,1	31,7	43,3
Chaux (CaO)	en %	22,7	25,7	23,2	25,8	21,5
Magnésie (MgO)	en %	1,2	1,2	1,3	1,1	1,3
$CaCO_3$	en %	42,0	48,0	41,9	48,7	40,0
Fer (Fe_2O_3)	en %	2,3	2,3	2,5	1,9	2,3
Alumine (Al_2O_3)	en %	5,6	6,1	6,0	6,4	5,9
Manganèse (MnO)	en %	0,02	0,03	0,04	0,02	0,04
Sulfates (SO_3)	en %	0,5	0,6	0,4	0,5	0,3
Phosphore total (P_2O_5)	en %	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3
Azote organique (N)	en %	0,8	0,5	0,3	0,6	0,4

Analyses exécutées par R. Monod et O. Gonet.

C'est surtout le cas des composés les plus labiles : matières organiques, phosphore total, azote organique et, dans une certaine mesure, carbonate de chaux. Le fait qu'il s'agisse là de produits dont certains entrent dans la composition des fertilisants dans l'eau, illustre les conséquences possibles du phénomène sur l'eutrophisation générale du Léman.

Il est vrai que, pour ce qui est des résultats obtenus sur les sédiments déposés au large de l'embouchure de la Promenthouse, ces observations sont en défaut. Mais c'est que, dans cette zone, les apports ont été influencés par la crue hivernale de la rivière.

Une autre manière encore plus directe d'observer ces phénomènes est de les imiter sur échantillons :

On mélange (doucement) un certain volume d'échantillon fraîchement prélevé et ayant conservé son humidité intacte, dans un volume égal d'eau du lac. On laisse reposer quelques heures, on filtre l'eau de suspension et on l'analyse :

1) Analyse de l'eau avant la remise en suspension de l'échantillon

Dureté	Teneur en NO_3	Teneur en phosphore (total exprimé en PO_4)
13°80	0,60 mg/l	0,21 mg/l

2) Analyse de la même eau après la remise en suspension d'un échantillon et après filtration

Numéro d'échantillon	Dureté	Teneur en NO_3	Teneur en phosphore (total exprimé en PO_4)
1	21°45	0,62 mg/l	1,55 mg/l
2	—	0,66 mg/l	0,25 mg/l
3	—	0,60 mg/l	3,87 mg/l
4	22°75	0,72 mg/l	4,76 mg/l
5	23°25	0,60 mg/l	3,75 mg/l

Ces résultats spectaculaires montrent l'importance du phénomène pour le cycle du phosphore.

En ce qui concerne les nitrates, en revanche, l'expérience est moins concluante. C'est que la plupart des composés azotés sont très solubles dans l'eau. On peut donc penser que les échanges en sont facilités et qu'au moment de l'expérience, la plus grande partie des nitrates a déjà quitté le sédiment.

VII. Conclusions

Dans le lac Léman, les échanges entre les sédiments superficiels du fond et l'eau du lac sont une réalité dont l'importance ne doit pas être sous-estimée. Certes, l'épaisseur du sous-sol qui risque d'être remis en suspension n'est pas très grande par rapport à l'énorme masse des eaux du lac. Dans la zone étudiée, nous l'avons grossièrement estimée à 10 cm. Mais, c'est là que s'accumule la totalité des précipitations organiques susceptibles d'être reminéralisées par les bactéries, puis de retourner en solution fertilisante dans l'eau.

Nous nous sommes borné, dans cette introduction, à poser le problème en termes concrets. A l'avenir, nos recherches dans ce domaine auront pour objet d'évaluer l'importance quantitative du phénomène.

Pour cela, beaucoup d'autres éléments restent à préciser :

— Jusqu'à présent, nous avons limité nos investigations à une zone plus ou moins littorale de 30 à 40 m de profondeur maximum, ce qui est manifestement trop peu. Il est vrai qu'en été, le sol situé à cette profondeur est particulièrement important pour l'eau du lac.

En effet, les courants le mettent en communication directe avec les zones superficielles du large. Celles-ci, en revanche, sont isolées des grands fonds par les barrières de la stratification thermique. Lorsque des hivers longs et rigoureux font tomber complètement ces barrières, on assiste, comme en 1962-63, à une augmentation générale de la concentration des eaux superficielles en fertilisants. Cela laisse supposer que le phénomène agit également en profondeur.

— Nos observations se sont limitées à une seule région peu étendue du lac. Avant de pouvoir généraliser nos conclusions, il convient de les vérifier ailleurs.

— Le poids des produits chimiques analysés dans ce travail constituait plus du 99 % du poids total de la matière sèche des échantillons. Néanmoins, leur liste est loin d'être complète. Bien d'autres éléments ont une influence considérable sur la vie dans l'eau du lac, même si leur concentration est faible.

* * *

Malgré le caractère incomplet des données sur lesquelles reposent nos interprétations, il n'en reste pas moins démontré que les échanges chimiques entre l'eau et le fond existent et jouent un rôle dans l'eutrophisation dont souffre notre lac.

On peut s'attendre à ce que le phénomène ralentisse l'apparition des signes d'amélioration de l'état sanitaire du lac. Lorsque le bassin sera équipé partout d'installations d'épuration des eaux jusqu'au 3e degré, il faudra attendre très longtemps que les eaux trop riches du lac soient renouvelées par le courant du Rhône.

Il est encore loin le temps où, comme MASSOL en 1894, nous pourrons conclure en écrivant :

« Genève est une ville privilégiée car l'eau du lac qui sert à son alimentation est non seulement une des plus belles, mais aussi une des plus pures qui existent. »

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

BOURCART, J. et FRANCIS-BŒUF, C. 1942. — *La vase*. Hermann, Paris.

BRAJNIKOV, B., FRANCIS-BŒUF, C. et ROMANOVSKY, V. 1943. — *Techniques d'étude des sédiments*. Hermann, Paris.

COLLET, L. W. 1931. — Varves récentes et anciennes. *C. R. Congrès inter. géograph. de Paris*, Colin.

DUSSART, B. 1966. — *L'étude des eaux continentales*. Gauthier-Villars, Paris.

FOREL, F. A. 1892. — *Le Léman, Monographie limnologique*, t. I, F. Rouge, Lausanne.

JOUKOWSKY, E. et BUFFLE, J. PH. 1938. — Constitution physique et chimique des sédiments du lac de Genève. *Mem. Soc. des Sc. Phys. et Nat. 41*, fasc. 4, 415-461. Genève.

GONET, O. 1971. — Les ondes internes et leurs applications. *Bul. A.R.P.E.A. n° 46*, 47-55. Neuchâtel.

LIEBMANN, H. 1960. — *Handbuch der Frischwasser- und Abwasser-biologie*. R. Oldenbourg, München.

MASSOL, L. 1894. — *Les eaux d'alimentation de la ville de Genève, étude bactériologique*. Rapport, Genève.

MONOD, R. 1956. — Contribution à l'étude des variations de la composition chimique des eaux du lac Léman. *An. St. C. Hydro. Ap.* T VI, p. 234-343. Paris.

PAREJAS, E. 1929. — L'épaisseur des varves dans le haut lac de Genève. *U.G.R. 3e congrès du Rhône*. Naville, Genève.