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

Kapitel: 5: Quelques propriétés physiques des sédiments

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: 21.07.2025

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

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° *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° *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° *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.

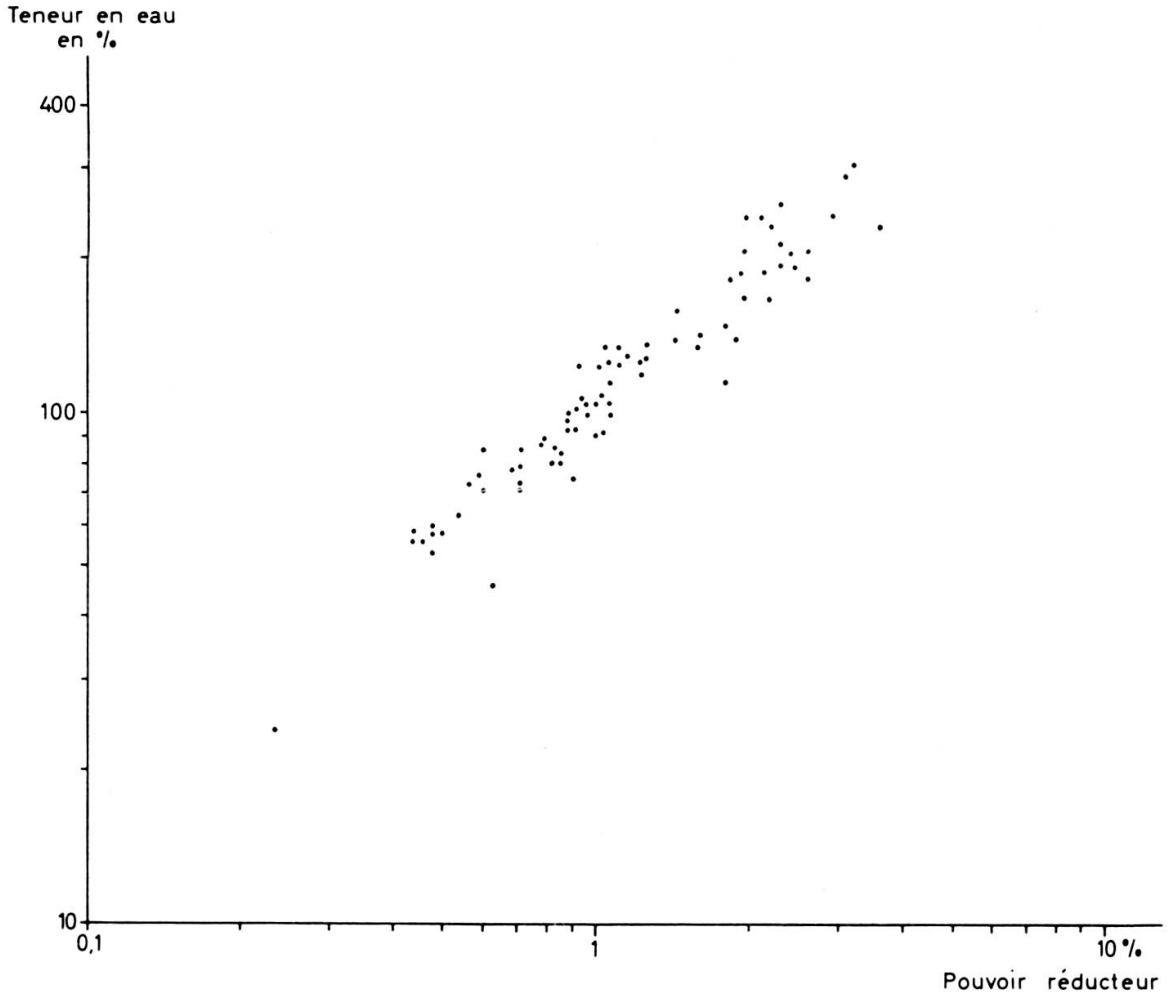

FIG. 22. — Corrélation entre la teneur en eau et le pouvoir réducteur des sédiments.

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° *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

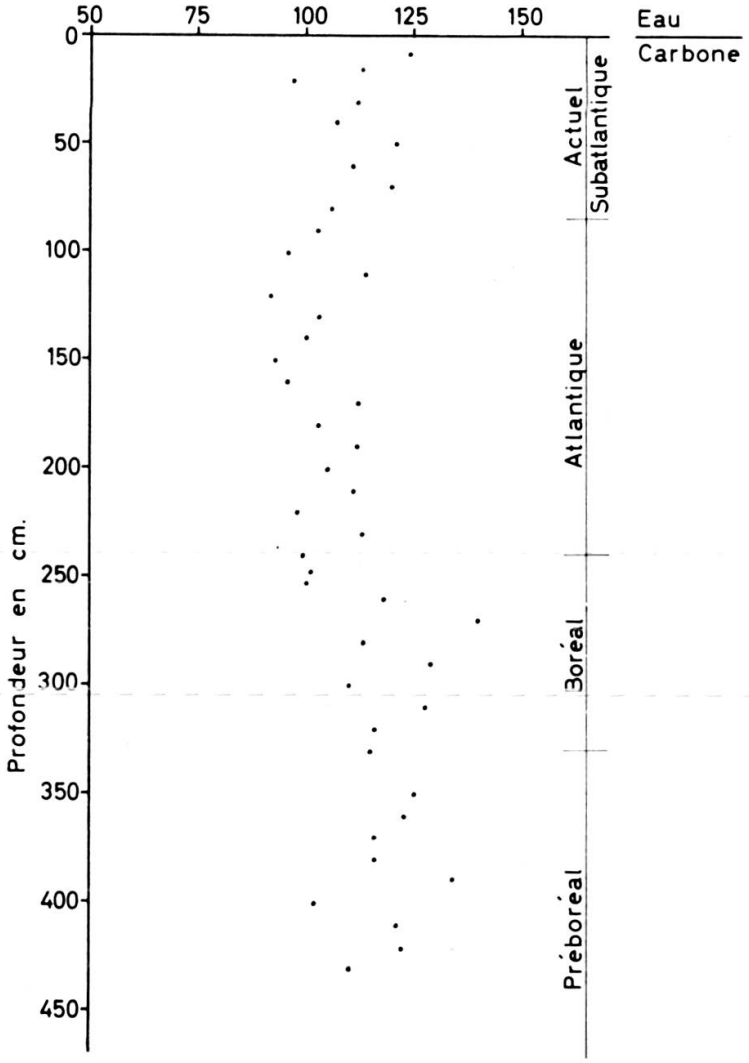

FIG. 23. — Évolution du rapport teneur en eau/carbone organique avec la profondeur. Carotte L 51 (80 m de fond au large de Corzent)

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° *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'accomplit 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 tassement, l'oxydation est un inducteur de diagénèse.

3° *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° 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° 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.

Reprenons 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° *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° *Dans les zones à sédimentation rapide*: le tassement syngénétique n'a pas lieu. La diagénèse est donc différée. 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 apparaîssent 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° *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,

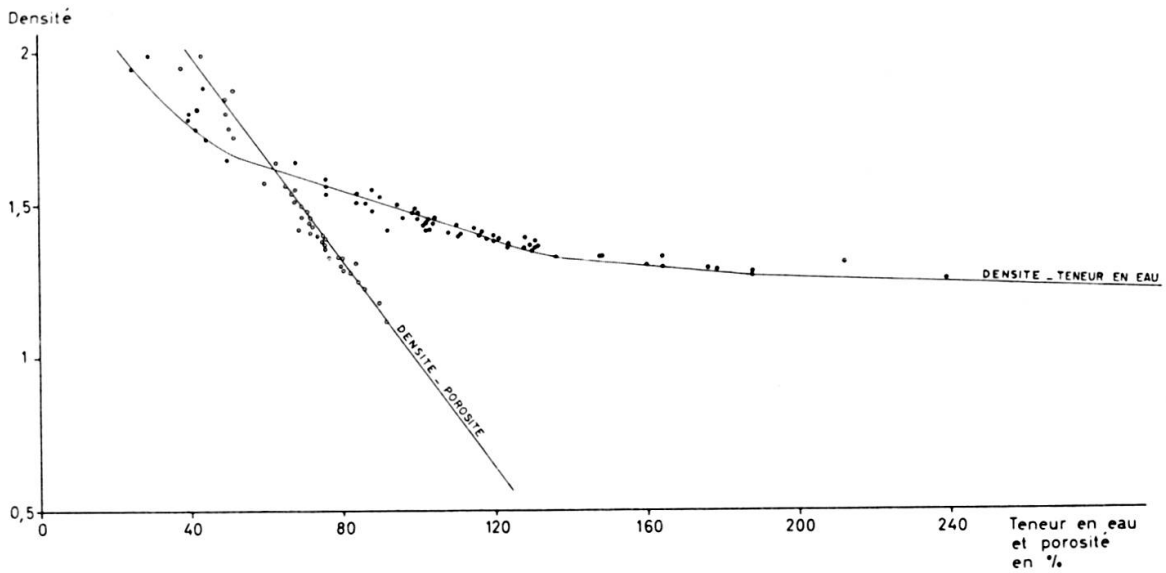

FIG. 24. — Variation de la densité du sédiment frais de la teneur en eau et de la porosité.

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° *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° *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 cœfficient d'absorption μ. Elle s'exprime par l'équation exponentielle:

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

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° *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 × 2 mm situés de 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 × 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'écarter 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° *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).

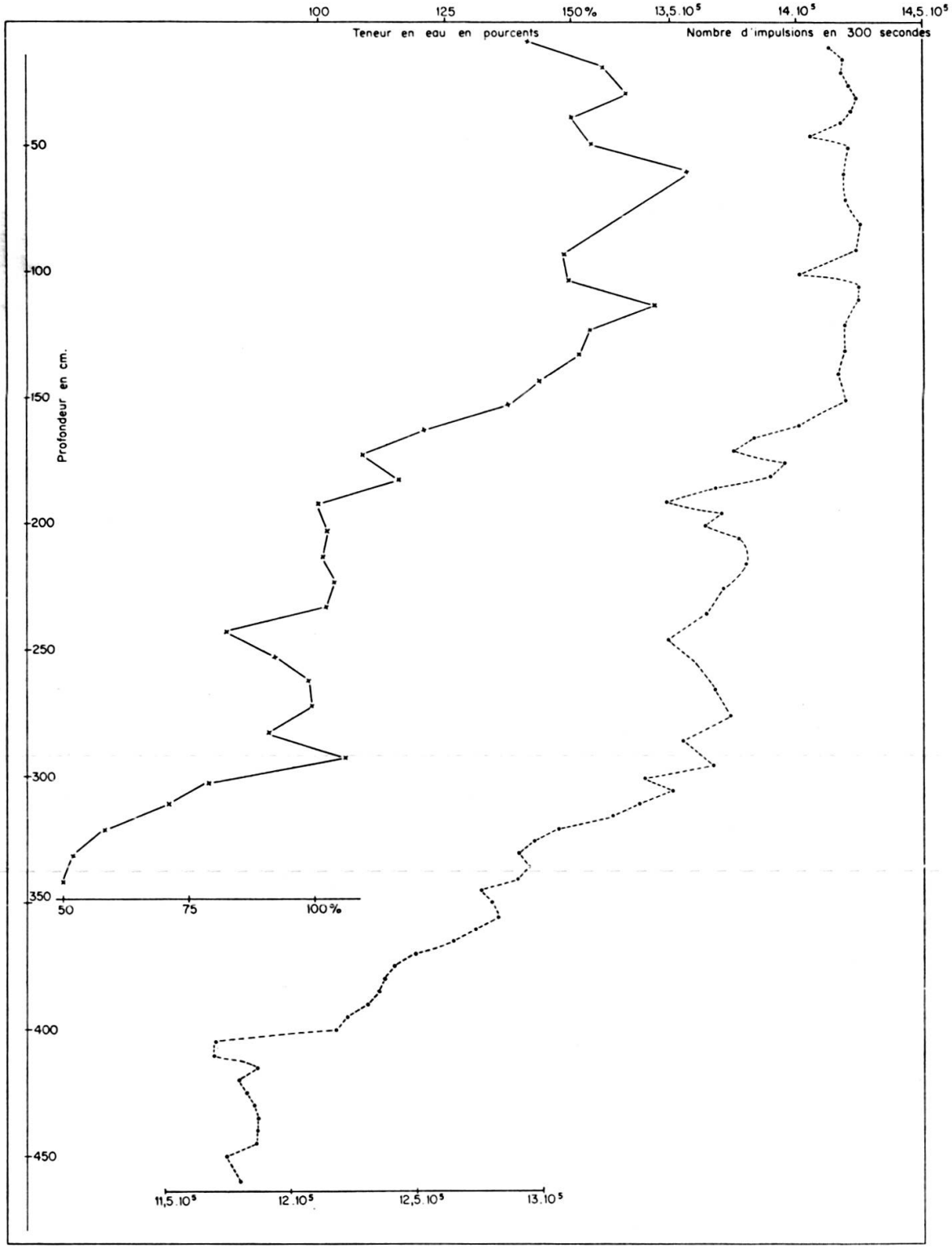

FIG. 25. — Courbe d'absorption γ de la carotte L 49.

CHAPITRE III

LA LIMITE 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 diagènese 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'extrémité 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 renseigneront sur les déformations subies par le milieu ou la pièce. Pour éviter les erreurs dûes 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/cm^2. La précision de la mesure est le 1/300 de la pression maximum soit 16 gr/cm^2. 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/cm^2.

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, fevrier et mai.

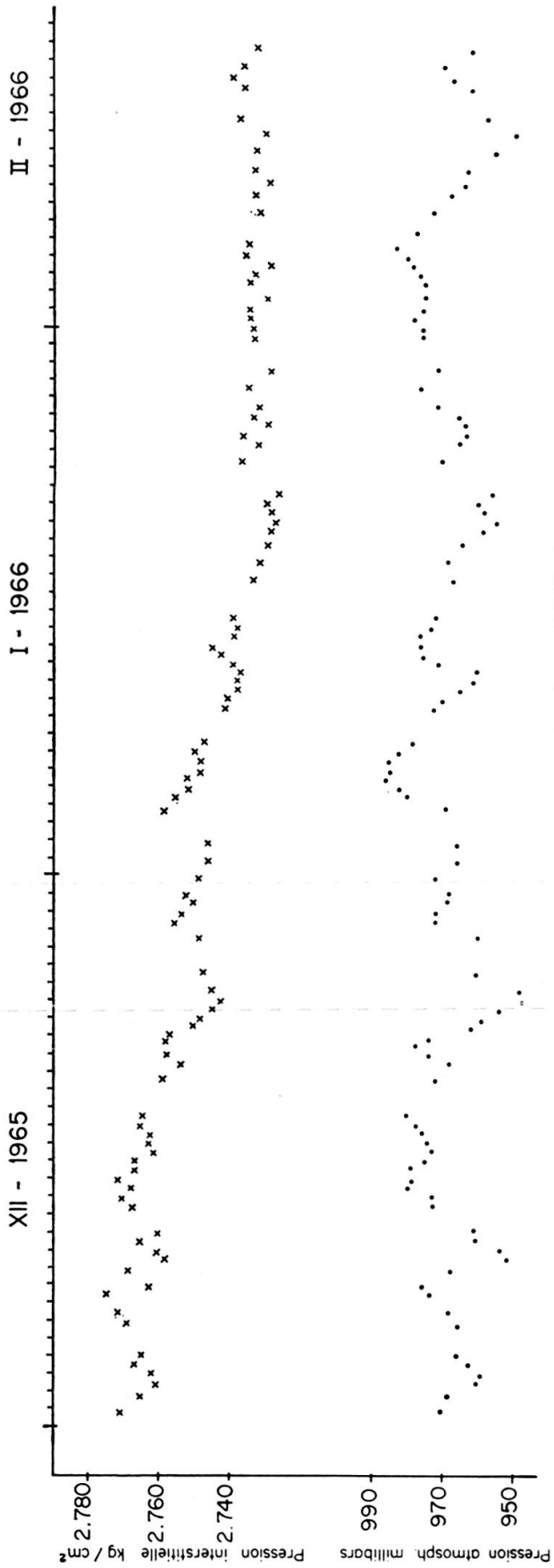

FIG. 26. — Variation de la pression interstitielle des vases.

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 tassement 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° Une baisse de pH dans la cuve en court-circuit,

2° 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° 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° 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, hydrogœthite, 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 ClNa 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 floculation 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 aggrégats (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/cm^2 (W. von Engelhardt et K.H. Gaida, 1963).

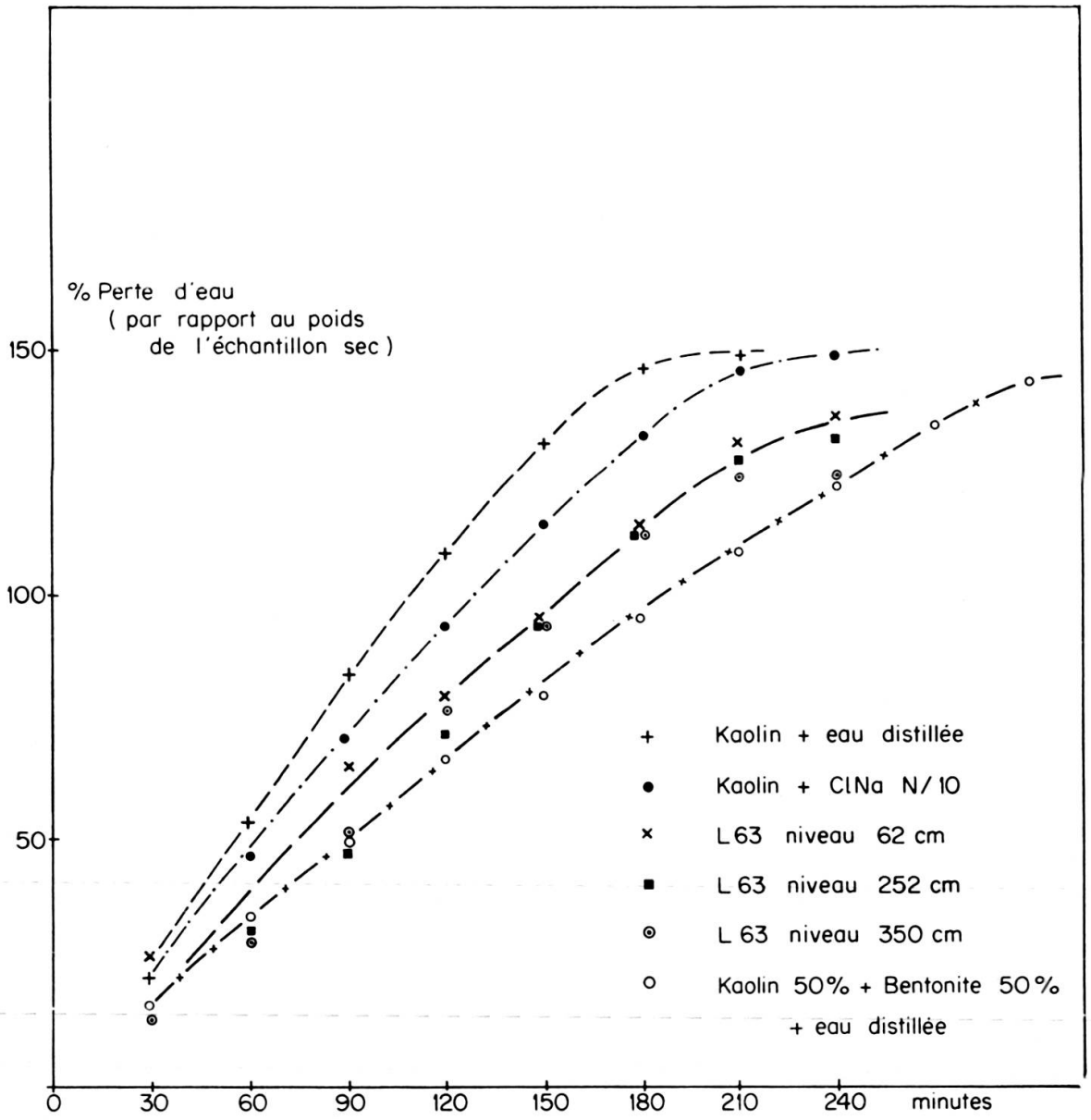

FIG. 27 — Courbes de deshydratation comparées des vases du Léman et de différentes argiles.