Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 4 (1924)

Heft: 1

Artikel: L'étude lithologique des roches sédimentaires

Autor: Déverin, L.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-6395

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: 10.12.2025

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

L'étude lithologique des roches sédimentaires.

Par *L. Déverin.*

Sommaire.

	Pages
Introduction	29
L'analyse psammographique	29
Roches sédimentaires et dépôts des mers actuelles	30
Procédés d'analyse: préparation de l'échantillon; désagrégation, tamisage; lévigation; extraction des minéraux lourds; examen des grains minéraux et des coupes minces	31
Roches difficiles à désagréger	36
Expression numérique des résultats de l'analyse psammographique	38
De l'emploi des termes de sable et de vase	41
Des résultats que l'on peut attendre de l'étude lithologique des roches sédimentaires	42
Conclusions	48
Bibliographie	49

Note. Les numéros entre crochets [ ] renvoient aux articles de la liste bibliographique.

Introduction.

Il n'est pas question de résumer ici le contenu de plusieurs ouvrages [4, 5, 6, 7, 8] consacrés à la description détaillée des procédés techniques applicables à l'étude lithologique des roches sédimentaires. Suivant les intentions du regretté professeur Grubenmann, qui voulut bien me tracer les grandes lignes de cet article, je me propose, d'une part, de faire ici l'exposé critique des méthodes que j'ai pratiquées au cours d'un travail publié récemment [18], et d'autre part, de montrer le parti que l'on peut tirer de ces méthodes.

L'analyse psammographique.

L'examen sous le microscope de roches sédimentaires réduites en plaques minces est une pratique de plus en plus répandue parmi les géologues. Le format de ces plaques excédant rarement 4 cm^2 et leur épaisseur ne dépassant guère 0,003 cm, il tombe sous le sens qu'une enquête portant sur ces 0,012 cm^3 laissera inaperçues une foule de particularités. C'est pourquoi il est nécessaire de

procéder, chaque fois que cela est possible, à la désagrégation de la roche afin d'en examiner les éléments isolés. Ces éléments séparés d'une centaine de grammes de la roche fournissent un nombre de préparations qui, en général, suffit amplement aux besoins actuels de l'étude lithologique. Il est avantageux de les trier par catégories de calibres et de densités. Ces procédés sont désignés en Italie sous le nom d'analyse psammographique.

Roches sédimentaires et dépôts des mers actuelles.

A part les cas où les sédiments ont été examinés en vue d'utilisations industrielles (argiles céramiques et réfractaires, sables à monazite, sables pour verreries et fonderies), il semble que les chercheurs attachés à l'étude des roches sédimentaires n'aient pas eu souvent d'autre ambition que de les comparer aux dépôts des mers actuelles. Les comparaisons de ce genre sont suggestives, certes: elles fournissent des renseignements sur la profondeur de l'endroit où le sédiment s'est accumulé, sur sa distance à la côte, sur la nature lithologique de cette côte, sur l'allure des courants qui sillonnaient la mer ancienne, sur la microfaune qu'elle hébergeait. Mais les conclusions tirées de ces comparaisons sont sujettes à diverses restrictions.

Les outils de dragage ne nous ont guère procuré jusqu'ici que les produits du grattage superficiel du fond des mers actuelles; à peine entamé en quelques endroits par le tube sondeur de Buchanan, l'instrument le plus puissant de l'arsenal océanographique, ce fond n'a livré que fort peu d'échantillons *stratifiés*. Les sondages ne nous fournissent que des fonds *meubles*, sédiments à l'état embryonnaire auxquels il reste à parcourir, pour se muer en roches, toute l'évolution connue sous le nom de diagenèse. Sans doute convient-il de ne pas perdre de vue, dans l'examen d'une roche, le fait que tout plan de stratification représente ce qui fut, à un moment donné, la surface de la lithosphère; mais, à partir de ce moment, cette surface s'est recouverte d'une couche épaisse de sédiment au sein de laquelle une longue série de phénomènes physiques et chimiques a lapidifié le dépôt. Il faut donc se rendre compte que le prélèvement d'un échantillon dans une puissante série stratigraphique, au Säntis ou dans le massif des

Diablerets, n'a qu'une analogie lointaine avec un coup de sonde lancé dans le fond de l'océan mésozoïque.

Par suite, les méthodes d'analyse qui peuvent donner des résultats satisfaisants quand il s'agit de scruter les fonds marins actuels s'adaptent souvent mal à l'étude des sédiments anciens se présentant, non plus sous l'aspect de vases ou de sables, mais de roches qui, sans avoir subi l'épreuve du métamorphisme typique, ont été soumises aux opérations diagénétiques et portent l'empreinte parfois profonde d'actions métasomatiques. Au surplus, le cas où des procédés d'analyse identiques conviennent également bien à des sédiments inégalement évolués implique fréquemment une interprétation *différente* des résultats des analyses, car des termes tels que *sable* et *vase* n'ont généralement pas la même signification suivant qu'ils s'appliquent à des constituants des dépôts actuels ou à des produits de triage mécanique provenant de la désagrégation de roches sédimentaires.

Procédés d'analyse.

Le traitement auquel il faut soumettre une roche sédimentaire dont on veut faire l'étude lithologique varie selon la composition et l'état d'agrégation de ses matériaux. On peut, avec M. Cayeux [4], ramener à 6 le nombre des cas qui peuvent se présenter:

1. Roche très cohérente, inattaquable par les acides faibles (Ex.: quartzite).
2. Roche très cohérente, partiellement soluble dans les acides dilués (calcaire gréseux).
3. Roche peu cohérente, inattaquable par les acides dilués (exemple: argile).
4. Roche faiblement cohérente, attaquable par les acides dilués (craie).
5. Roche meuble, inattaquable aux acides faibles (sable siliceux).
6. Roche meuble et attaquable par les acides faibles (sable à grains calcaires).

Bien que M. Wetzel ait préconisé l'examen d'éclats de silex [28], la seule méthode toujours applicable à la catégorie 1 est celle des coupes minces. La même méthode est indispensable pour étudier les catégories 2, 3 et 4. Il

est généralement inutile de recourir à la taille des roches meubles. Dans les cas 3 et 4, la désagrégation s'exécute sur la roche préalablement détrempée et ramollie en la frottant sous l'eau à l'aide d'une brosse douce. Quand la roche est attaquable par les acides dilués, on recourt toujours à cette propriété pour en désagréger au moins une partie.

Le deuxième type de sédiment étant des plus fréquents, c'est celui-là que nous décrivons en détail, en prenant pour exemple un calcaire marneux.

Préparation de l'échantillon. Afin d'accélérer la désagrégation de la roche par l'acide, on la concasse grossièrement. Certains auteurs anglais [6] passent le matériel fragmenté à travers un tamis dont les mailles ont 1 mm de diamètre et font porter leur examen sur la portion qui a franchi le tamis. Le passage au crible est, en effet utile, mais je conseille d'*éliminer*, au contraire, cette portion menue et poussiéreuse, car il est évident que plus la roche est fragmentée, plus nombreux sont les éléments brisés (minéraux, spicules d'Eponges, etc.) qui peuvent tromper sur les conditions dans lesquelles le dépôt s'est effectué. On retiendra donc, pour les soumettre aux traitements ultérieurs, les morceaux de 0,5 à 1 cm^3 et l'on rejettera la portion pulvérisée qui franchit le tamis de 1 mm.

Désagrégation. Lorsqu'on a ainsi préparé un échantillon d'une centaine de grammes, on le sèche à l'étuve à 110° et on le pèse (à 1 g près), après quoi, on le place dans une grande capsule et on le couvre d'acide chlorhydrique étendu de 4 fois son volume d'eau. Au bout de 12 heures la capsule et son contenu sont chauffés légèrement et encore additionnés d'acide. S'il ne se produit plus d'effervescence, le contenu de la capsule est versé sur un tamis n° 80 et la boue se délaye à l'aide d'un pinceau sous le jet d'une pissette. S'il reste des noyaux de roche inattaquée, ils sont traités par l'acide jusqu'à décalcification complète. La boue fluide qui a franchi le tamis est versée sur un filtre taré et lavée jusqu'à ce que le liquide filtré ne bleuisse plus à l'addition de ferrocyanure de potassium. Cette réaction colorée est due au fait que tous les sédiments renferment un peu de fer; elle peut provenir aussi du fer dissous dans l'acide employé, car l'acide ordinaire du commerce convient fort bien, pour autant que l'on ne se propose

pas de doser le fer dans la roche. Le liquide filtré, traité par les méthodes ordinaires de l'analyse chimique peut servir pour la diagnose de Ca, Sr, Ba, Mg et des métaux alcalins, si le besoin s'en fait sentir. Si le filtrat a été recueilli dans un vase gradué, cette analyse de la portion soluble peut devenir quantitative. Cependant ce procédé présente des inconvénients: pour obtenir sur le filtre un résidu insoluble convenablement lavé, il faut parfois employer plusieurs litres d'eau. Il est préférable de réserver les premières eaux de lavage uniquement pour l'analyse qualitative qui indique, à une approximation grossière, l'abondance on la rareté du Mg, par exemple. Si les recherches que l'on se propose exigent des analyses chimiques quantitatives, le procédé le plus expéditif et le seul correct consiste à prendre un nouvel échantillon de 2 à 5 g et à se conformer strictement aux prescriptions des traités d'analyse.

La différence entre le poids initial de l'échantillon et celui du résidu insoluble séché à 110° donne la proportion de matières solubles dans l'acide. Celles-ci se composent essentiellement de calcaire plus on moins dolomitique et ferrugineux, souvent accompagné d'un peu de gypse, de phosphate de chaux et de sels alcalins. Une détermination plus exacte des carbonates solubles s'obtient à l'aide d'un flacon spécial, par le dosage du CO_2 que perd 1 g de roche pulvérisée traitée par HCl.

Tamisage. Le résidu insoluble dans l'acide est délayé dans l'eau sur un tamis n° 100 (100 mailles au pouce de 27 mm). Pour les roches peu sableuses et à grain fin, les passages successifs aux tamis 30, 60, 100 et 200 sont superflus. Bien qu'il existe plusieures de nomenclature pour désigner les produits de tamisage de finesse croissante, nous nous contentons généralement des divisions suivantes: *portion sableuse grossière*, pour celle qui reste sur le tamis 100; *sable fin + vase* pour les éléments qui franchissent ce tamis. Du poids de la portion sableuse grossière, on déduit celui du sable fin et de la vase.

Lévigation. La vase sableuse passée au tamis 100 est agitée avec de l'eau dans un vase cylindrique d'une capacité de 1 à 2 l., puis abandonnée au repos. Le liquide étant fortement chargé de boue, les particules sableuses tombent lentement au début, et il faut attendre près d'un

quart d'heure, jusqu'à ce qu'aucune lamelle cristalline ne miroite plus dans l'eau vivement éclairée. Le liquide trouble est soutiré à l'aide d'un siphon à branches courtes et à débit lent; le dépôt boueux est agité vigoureusement, puis remis en suspension. Après quelques lavages le liquide au repos se clarifie rapidement: la chute des particules cristallines devient plus franche à mesure que la vase s'élimine; on peut bientôt employer des siphons à branches plus longues et à débit plus rapide, sans crainte de voir le sédiment grenu entraîné. La lévigation doit continuer jusqu'à ce que l'eau tenant le sable en suspension se clarifie complètement en 5 minutes.

L'extraction des minéraux lourds s'exécute sur le sable fin, qui doit être *bien sec* si l'on veut obtenir un bon triage à l'aide du bromoforme. La séparation peut s'obtenir dans un entonnoir *ad hoc*, ou bien, si la quantité de sable n'excède pas 10 g, elle peut se faire dans 2 capsules à fond rond. La 1ère contient le sable sortant de l'étuve; quand elle est froide et qu'elle a été pesée, on ajoute le bromoforme. Après avoir convenablement agité le mélange avec une baguette de verre et laissé reposer pendant quelques minutes, on décante avec précaution dans la 2e capsule, où s'opère un nouveau dépôt, généralement très ténu, de minéraux lourds ($d > 2,9$). On verse le bromoforme avec le sable flottant sur un filtre. Le liquide clair ruisselle sur les bords de la capsule n° 1 et entraîne les grains légers qui y restaient collés. La même opération se répète avec la capsule n° 2 placé sous l'entonnoir, et l'on recommence jusqu'à ce que l'on ait amené tout le sable léger sur le filtre et que les capsules ne renferment plus que le résidu lourd. Le tout est alors lavé à l'éther, séché et pesé.

La quantité de minéraux lourds est souvent si faible qu'il est prudent de les monter immédiatement dans le baume du Canada.

Pour fixer les idées, j'indiquerai les proportions moyennes d'éléments psammographiques divers trouvés dans les roches marneuses que j'ai étudiées jusqu'ici:

Calcaire 65—85 %; portion sableuse grossière 0,1 à 1 %; sable fin 2 à 12 %, contenant de 0,001 à 0,01 % de minéraux lourds; vase 10 à 20 %.

Pour obtenir des quantités appréciables de minéraux lourds, si l'on affaire à des calcaires pauvres en éléments détritiques (craie, Hochgebirgskalk, Schrattenkalk), il faut partir d'échantillons dont la masse varie de 500 g à 1 kg.

Examen des grains minéraux. Lorsque le sédiment n'est ni gréseux ni fortement glauconieux, la portion grossière retenue par le tamis 100 renferme ordinairement fort peu de grains détritiques. On y trouve des fragments de roche non désagrégée, des dépouilles organiques silicifiées ou pyritisées, des spicules d'éponges, des cristaux ou des rognons de pyrite plus ou moins oxydée, des moulages glauconieux de foraminifères, etc. On voit donc que, dans bien des cas, ce refus du tamis 100 ne mérite *pas* le nom de *sable*.

Ce résidu grossier ne se laisse pas facilement examiner sur une lame de verre plane: il est avantageux de le placer à cet effet dans un godet recouvert d'une glace ou sur une lame à cupule. Le sable fin s'observe sur un porte-objet ordinaire, à sec et dans l'eau, et dans ce dernier cas, il est préférable de le recouvrir d'une lamelle.

Le *quartz* domine généralement parmi les grains détritiques fins. On note la forme des grains, l'uniformité ou la variabilité de leurs calibres, leur état de fraicheur ou d'usure. Tous ces caractères renseignent sur la longueur du trajet et le mode de transport des matériaux clastiques. Certaines particularités, tels les stigmates de l'usure éolienne, n'apparaissent bien que sur les grains secs. Des *micas* blancs et des *feldspaths* accompagnent le quartz. Parmi les feldspaths, il y a lieu de distinguer 2 catégories: d'une part, des fragments de clivage généralement altérés par séricitisation ou kaolinisation, et d'autre part, des individus très nets, allongés suivant l'arête des faces (001) et (010) et montrant le biseau $(1\bar{1}0)$, (110). Ce biseau, ne pouvant être le résultat d'un clivage, indique, surtout si les grains de quartz témoignent d'une usure avancée, que l'on se trouve en présence de *feldspath authigène*, qui est *très fréquent* dans les sédiments alpins.

A côté des grains minéraux figurent souvent des spicules d'éponges en opale, en calcédoine ou en quartz, des foraminifères silicifiés, de la glauconie, etc. Chacun de ces éléments, convenablement scruté, peut fournir des renseignements, tant sur les conditions de sédimentation que sur les phénomènes postérieurs à la solidification de la roche.

Les *minéraux lourds* que l'on peut extraire de la plupart des sédiments alpins sont, à part la pyrite: le zircon, le rutile, la tourmaline, l'anatase, souvent accompagnés de

brookite et de staurotide. En outre, il n'est pas rare de rencontrer diverses amphiboles, le chloritoïde, l'épidote, le disthène et le grenat.

Si la quantité des minéraux lourds n'est pas trop faible, il est expédient de les examiner dans des liquides d'indices de réfraction gradués, faute de quoi, parmi ceux qui sont figés dans le baume, il en est toujours qui défient le diagnostic.

Les Coupes minces taillées dans le bloc qui a fourni l'échantillon désagrégé permettent de reconnaître les éléments que la dissolution par l'acide a fait disparaître et renseignent sur le mode d'association de tous les éléments. Cet examen conduit donc à reconstituer l'*histoire* de la roche, histoire dont on avait précédemment rassemblé les documents épars. Il est essentiel d'observer, sous tous leurs aspects et dans les 3 dimensions, les éléments dissociés avant de passer à l'étude de la coupe mince, et il est souvent nécessaire de retourner plusieurs fois de la coupe mince aux préparations faites d'éléments dissociés si l'on veut bien saisir les rapports mutuels de ces éléments dans la roche intégrale.

Roches difficiles à désagréger.

Bien que formées en majeure partie de calcaire, certaines roches renferment en outre des éléments qui en rendent la désagrégation très difficile. En voici des exemples.

Marnes gypseuses. Les marnes correspondant aux boues bleues des océans actuels contiennent fréquemment de la pyrite finement divisée. Ce sulfure, s'oxydant en présence de calcaire, donne naissance à du gypse dont la proportion dans la roche s'élève facilement jusqu'à 4 %. A ce taux-là, ce sulfate est généralement invisible au microscope, mais sa présence gêne considérablement la désagrégation de la roche. Si l'on s'avise de chauffer la roche soumise à l'attaque de l'acide, le sulfate de calcium se dissout dans l'acide et se dépose par refroidissement en aiguilles très fines constituant un feutrage volumineux. Il est alors nécessaire, pour mener la désagrégation jusqu'au bout, d'opérer dans une liqueur renfermant un large excès d'acide, de décanter et de filtrer à chaud et de recommencer plusieurs fois. Le lavage du résidu insoluble sur le filtre doit se faire à l'eau bouillante acidulée; la dissolution du gypse amène une contraction notable du contenu du filtre

au cours de cette opération fastidieuse, mais qui doit se prolonger jusqu'à ce qu'une goutte de liquide filtré, évaporée sur un porte-objet, n'y laisse plus d'aiguilles de gypse.

La présence du gypse explique l'incorrection que l'on commet lorsqu'on prétend doser le calcaire par différence entre le poids de la roche et celui de son résidu insoluble. Le cas des roches phosphatées donnerait lieu à des remarques analogues.

Marnes imprégnées de silice. Il n'est pas rare de rencontrer des marnes à Spongiaires siliceux dans lesquelles la plus grande partie des spicules a été *calcifiée* : la silice déplacée imprègne le ciment argileux de la roche de façon si intime qu'il est parfois très difficile de la déceler dans les coupes minces quand elle est restée à l'état d'opale. Bien que que l'on n'arrive pas à *voir* cette opale dépourvue de biréfrigence, on se rend compte de sa présence en observant, à l'aide d'un objectif fort, les endroits les plus clairs de la préparation : les grains calcaires du ciment, non pas anguleux, mais aplatis et lobés, ne sont plus contigus : ils semblent flotter à diverses profondeurs, escortés de fines particules irrésolubles, dans un milieu légèrement trouble et un peu plus brun que le baume.

La présence de cette opale d'imprégnation ne se trahit, dans certains cas, que par l'impossibilité de désagréger la roche par l'acide, d'où l'obligation de recourir à une lessive chaude de potasse pour en dissocier les éléments. Quand ce cas se présente, force est de renoncer au schéma d'analyse psammographique donné précédemment, car la potasse attaque aussi bien le calcaire que la silice et la partie argileuse de la roche. Si, en vue de compléter la désagrégation de la roche, on répète plusieurs fois le traitement par la potasse, on voit les feldspaths, débarrassés de leurs produits d'altération, montrer une fraîcheur inusitée ; de nombreux grains de quartz, rajeunis dans le bain corrosif, exhibent des arêtes aussi vives que du cristal de roche fraîchement concassé, tandis que d'autres, les plus limpides, sont complètement arrondis. Les spicules en calcédoine résistent à l'épreuve prolongée de la potasse au moins aussi bien que le quartz : tout au plus sont-ils marqués de quelques fossettes de corrosion.

En somme, il reste à trouver une méthode de désagrégation applicable aux roches imprégnées de silice et qui

fournisse des résultats d'analyse psammographique comparables à ceux que donnent les roches à ciment non imprégné d'opale.

On ne peut jamais se vanter d'extraire d'une roche totalement et uniquement la silice dite soluble dans la potasse; toutes les formes de silice — et de nombreux silicates — étant attaquables, à des degrés divers, par cet alcali, il importe, en vue d'obtenir des résultats comparables, d'opérer toujours dans les mêmes conditions. Pour se conformer strictement à cette règle, il ne suffirait pas de traiter tous les échantillons de roches par une lessive de concentration invariable, à température constante, pendant le même nombre d'heures, mais encore faudrait-il opérer sur des matériaux dans le même état d'agrégation. Or le seul moyen permettant de réaliser cette dernière condition consisterait à les réduire tous en poudre impalpable. On peut se rapprocher de cette condition en opérant sur la roche concassée plus finement que nous ne le faisons ordinairement, mais débarrassée de poussière à l'aide d'un tamis (n° 60, par exemple). En procédant ainsi, on ne sacrifie pas complètement la partie psammographique qui constitue le grand avantage de l'étude des roches sédimentaires, mais il faudra alors se montrer très circonspect dans les conclusions que l'on tirera de l'état d'usure ou de fraîcheur des grains siliceux.

Expression numérique des résultats de l'analyse psammographique.

Les éléments constitutifs, — calcaire, portions sableuses grossière et fine, vase, — étant séparés par les manipulations décrites tout à l'heure, quelle exactitude peut-on attendre d'une telle méthode? Faut-il chercher à en augmenter la précision?

J'ai proposé d'évaluer à 1 % près la masse de l'échantillon soumis à l'analyse, celle du calcaire soluble et celle du résidu insoluble. L'expérience apprend, en effet, que divers échantillons tirés du même bloc de roche en apparence homogène présentent des variations de la teneur en calcaire de l'ordre du centième. Peut-être y aurait-il lieu de pousser l'approximation jusqu'à 1 ‰ si l'on se proposait, par exemple, d'étudier les variations de la teneur en cal-

caire dans une série stratigraphique sur des échantillons prélevés verticalement de décimètre en décimètre?

Il ne faut pas se laisser leurrer par une précision illusoire: ce que l'on désire connaître, ce n'est pas la composition de l'échantillon analysé, qui aurait été différent s'il avait été prélevé 1 m plus loin, mais c'est la composition globale et variable de la strate d'où il a été tiré. D'autre part, les éléments assemblés dans les roches sédimentaires non salines ne s'y trouvent pas associés en vertu de lois stoechiométriques, ne procédant ni d'une même solution ni d'un même magma. Bien que le sédiment soit un champ d'action pour des phénomènes physico-chimiques, les matières qui réagissent entre elles se trouvent en présence de quantités considérables de substance inerte; aucun équilibre chimique n'y est possible, si ce n'est au bout d'un temps infini et à supposer que les conditions d'équilibre (pression, température, concentration) demeurent invariables, ce qui n'est assurément pas le cas. Il est donc vain de chercher dans la lithologie sédimentaire une précision comparable à celle des analyses de roches éruptives. Sur ce dernier point, d'ailleurs, il y aurait beaucoup à dire, car la précision qui règne là est d'ordre chimique; elle ne concerne généralement que l'échantillon analysé, et non pas la masse éruptive qu'elle prétend définir à 0,01 % près.

Pour les mêmes raisons, et pour d'autres encore que je vais exposer, la détermination des quantités de sable et de vase contenues dans un sédiment ne peut pas raisonnablement s'exprimer avec une approximation dépassant 1 %.

La vase a été définie comme l'ensemble des particules qui restent en suspension dans l'eau 5 minutes après que le liquide, violemment agité par brassage, a été abandonné à lui-même. Pourrait-on opérer *utilement* dans des conditions toujours telles que les débris en suspension aient un calibre maximum donné? Est-il indiqué de leur appliquer la loi de Stokes et de tenir compte, dans nos manipulations, des travaux sur la sédimentation publiés par Sorby, Sudry, Owens, Badoureau, Sven Odèn, en calculant le temps qu'il faut laisser à une particule de densité ϱ et de diamètre d pour qu'elle atteigne le fond d'un vase recouvert de h cm d'eau? La vanité d'un tel calcul apparaît dès que l'on remarque qu'il ne s'applique qu'à la chute d'une particule dans

un liquide *en équilibre*; elle est plus frappante encore si l'on observe que les particules cristallines réalisent toutes les formes possibles, et que celles que la lévigation entraîne avec les flocons vaseux ont un diamètre si faible que leur nature minéralogique reste le plus souvent douteuse. Enfin l'impossibilité pratique d'appliquer ces spéculations à notre genre de travail devient manifeste quand on considère le résultat de la séparation de la vase et du sable : malgré tous les soins que l'on peut apporter aux manipulations destinées à débarrasser les grains minéraux de leur gangue, et bien que certains résidus insolubles aient été soumis aux opérations de lévigation décrites plus haut pendant 8 jours, à raison de 20 ou 30 lavages par jour, les grains tombant dans une eau parfaitement claire restaient encroûtés d'une gangue tenace.

Un moyen propre à nettoyer ces grains suffisamment en vue de l'examen sous le microscope consiste à les soumettre 1 ou 2 fois à l'action de SO_4KH fondu et à faire bouillir le flux obtenu avec de l'eau. Dans tous les cas où j'ai procédé à cette opération, une goutte de la liqueur clarifiée déposait des cristaux octaédriques d'alun. Cette réaction prouvait que la gangue des grains renfermait de l'alumine, mais non pas nécessairement qu'elle était argileuse. En effet, les études récentes de Thiébaut [25, 26] sur les marnes d'Alsace ont révélé que la partie vaseuse de ces marnes se composait non pas d'argile, mais de quartz, de mica blanc et d'un silicate voisin de la céladonite et de la bravaisite.

Argileuse ou non, cette gangue tenace adhérant aux grains détritiques fausse les résultats de la détermination des proportions de sable et de vase contenues dans les roches.

Dans les cas que j'ai observés, ces restes de ciment liant les grains de sable étaient parfois chargés d'opale, ou de pyrite, ou encore constitués par du *feldspath néogène*. Les feldspaths néogènes de forme caractéristique ont une longueur minima voisine de 0,05 mm. Au-dessous de cette taille, la netteté des formes s'atténue. Les grains les plus petits sont arrondis et fréquemment agglomérés. Les amas les plus volumineux, empâtés de gangue, d'où émerge parfois l'extrémité d'un grand cristal terminé en biseau, s'écrasent difficilement. Leurs débris montrent encore des

couronnes de bourgeons granuleux adhérant à des masses de particules si fines qu'elles ne polarisent plus, de sorte qu'il est malaisé de distinguer le feldspath déjà différencié de la gangue silico-alumineuse qui lui a donné naissance. Les résidus de dissolution les mieux lavés pourront donc renfermer de ces petits fragments de roche où l'argile est intimément associée au feldspath.

De l'emploi des termes de sable et de vase.

Quoique sachant pertinemment que les grains d'un sable peuvent se composer de cent matières diverses, nous sommes tentés d'attribuer au quartz un rôle prépondérant dans sa constitution. Et au fait, dans l'examen de la portion sableuse d'un sédiment, ce n'est pas aux micas, ni aux minéraux lourds, ce n'est pas tant aux feldspaths clivables et altérables, mais au quartz inerte supportant longtemps l'usure que nous demandons des renseignements sur l'origine du sable, la longueur de son trajet, etc. Mais n'oublions pas que le chiffre indiquant la proportion de grains retenus par des tamis plus ou moins fins peut être trop fort ou trop faible pour indiquer la proportion des minéraux détritiques qui sont les éléments d'un *sable* proprement dit. Ce chiffre est trop faible quand du calcaire détritique s'est mêlé au sédiment, de façon à constituer parfois un sable à grains calcaires, appelé *calcarénite* par certains auteurs américains. Il est trop fort quand des minéraux diagénétiques (pyrite, feldspaths néogènes, glauconie, silex, etc.), figurent dans les résidus de dissolution. D'autre part, il est difficile de ranger sur la même ligne que les éléments clastiques les débris organiques silicifiés qui abondent dans plusieurs de ces résidus; tels les spicules de spongiaires, transformés ou non en calcédoine, qui en forment quelquefois la plus grande partie. Certains d'entre eux peuvent être remaniés et jouer le rôle d'éléments détritiques [19]. Mais il doit être convenu que spicules et tests de foraminifères silicifiés mêlés aux éléments détritiques n'ont, à de rares exceptions près, jamais fait partie intégrante du *sable* déposé dans les sédiments.

Quant à l'emploi que nous avons fait jusqu'ici du terme de *vase*, c'était pour désigner l'ensemble des éléments détritiques les plus fins *privés de leur calcaire* par l'action

d'un acide. Or il importe de remarquer que la vase des sédiments avant la diagenèse est presque toujours carbonatée: elle renferme du calcaire détritique, du calcaire zoogène pulvérisé, du calcaire précipité par les bactéries, des coccolithes, etc. On voit donc que le terme de *vase* prend une signification différente suivant qu'il s'applique à un dépôt récent ou à un sédiment fossile.

Des résultats que l'on peut attendre de l'étude lithologique des roches sédimentaires.

Parmi les nombreux problèmes proposés aux adeptes de la lithologie sédimentaire, — et pour ne parler que des questions scientifiques, — nous citerons les suivants:

1° Comparer les sédiments anciens aux sédiments actuels et établir un parallèle entre les termes des séries stratigraphiques et les diverses catégories de dépôts marins, afin de reconstituer les conditions de sédimentation durant les âges géologiques.

2° Utiliser les caractères des collections de minéraux détritiques extraits des roches sédimentaires pour reconstituer l'océanographie des mers anciennes, la puissance et la direction de leurs courants.

3° Déterminer les caractères lithologiques propres à chaque étage dans les séries stratigraphiques afin de pouvoir identifier une couche donnée dans les gisements où les fossiles caractéristiques font défaut.

Plusieurs chercheurs se sont attachés à la solution de la 2e question. Le nombre des espèces minérales semées dans les sables de la Grande Bretagne est considérable et leurs aires de distribution sont assez bien connues, ainsi que leurs origines. L'allure des courants qui les transportaient a été esquissée, mais elle est loin d'être connue avec exactitude pour chaque âge géologique. — De nombreux sédiments du bassin de Paris, minutieusement examinés par M. Cayeux ont fourni des minéraux dont le gîte originel a pu être déterminé.

La 1ère question n'a jamais été, à notre connaissance, abordée systématiquement. Il serait d'ailleurs, nous semble-t-il, prématuré de s'y attaquer. En effet, puisqu'il faut s'appuyer sur des faits connus pour scruter l'inconnu, les résultats de l'étude des dépôts marins actuels forment-ils

un ensemble si cohérent que l'on puisse les considérer comme une solide base de départ? Nous ne le pensons pas. Si intéressants que puissent être les faits acquis, si approfondis que soient certains chapitres (la genèse de la glauconie, par exemple) [17], on peut se demander laquelle des 2 sciences, celle des dépôts actuels ou celle des sédiments anciens progressera le plus rapidement, vu que le pétrographe, en contact direct avec l'objet de son étude, choisit ses matériaux à volonté, tandis que l'océanographe doit se contenter des produits, recueillis à l'aveuglette, du grattage superficiel du fond des océans.

Les recherches tendant à résoudre la 3e question ont conduit à des succès partiels: c'est ainsi que la présence de la glaucophane dans les roches miocènes de l'Italie centrale permit à Chelussi [14, 15, 16] de distinguer les sédiments helvétiens des dépôts antérieurs.

M. Thoulet [27] avait déjà comparé le profit que l'on peut tirer de la présence de divers minéraux dans les sédiments aux services rendus par les fossiles en stratigraphie. Or il y a de bons et de mauvais fossiles: les bons proviennent d'animaux qui s'adaptèrent rapidement aux conditions variables de leur milieu ou qui disparurent. En psammographie, les mauvais fossiles sont les minéraux ubiquistes, quasi indestructibles, capables de survivre à plusieurs cycles de sédimentation (rutile, zircon), tandis que les tourmalines diversement colorées, la staurotide, l'andalousite, le disthène, les amphiboles, les pyroxènes, plus périssables et suffisamment caractéristiques, peuvent rendre de précieux services.

Encouragé par les succès de Chelussi, l'auteur de ces lignes a tenté de fixer les caractères lithologiques des roches crétacées des Alpes-Maritimes [18] qui devaient suppléer, dans la mesure du possible, à l'insuffisance des repères paléontologiques. Les résultats de son enquête se résument comme suit:

Il n'existe pas de type lithologique propre à chaque étage dans le Crétacé de la région considérée. Les conditions de sédimentation dans cette partie du géosynclinal alpin se modifiant peu du Berriasien au Campanien, la texture intime des roches n'accuse que des variations locales dans la faune et dans le faciès des dépôts sous-marins. Qu'il s'agisse du faciès glauconieux, du faciès à Spongiaires ou

du faciès à Echinodermes, ils peuvent être récurrents à un âge à peu près quelconque et différer si peu entre eux que l'étude micrographique est impuissante à distinguer à coup sûr tel sédiment cénomanien de tel autre d'âge santonien.

La réponse fournie par l'examen des minéraux lourds extraits des mêmes roches n'est pas plus satisfaisante: 5 minéraux transparents et de densité élevée se trouvent réunis dans la plupart des résidus de dissolution; ce sont le zircon, le rutile, la tourmaline, l'anatase et la brookite. La staurotide s'adjoint souvent à eux, mais il faut constater la rareté extrême ou l'absence d'autres silicates. Même en tenant compte de la fréquence relative de chacun des minéraux précités, la liste des gemmes fournie par chaque étage ne peut, en aucun cas, servir de fiche d'identité. Par suite, *les minéraux et les associations minérales ne peuvent pas tenir lieu de fossiles caractéristiques* dans le terrain crétacé des Alpes-Maritimes. Enfin des collections minérales aussi peu variées que celles-là sont loin de fournir des données paléoocéanographiques permettant de dresser la carte des courants de la mer crétacée à diverses époques.

„Les résultats d'une étude aussi laborieuse, remarquait le prof. Grubenmann à ce propos, sont peu encourageants, mais ils n'ont rien qui puisse surprendre si l'on y réfléchit sérieusement. Cependant, ajoutait-il, il y a lieu de ne pas abandonner ce genre de recherches et de l'appliquer à nos roches des Alpes Suisses."

Oui, certes, il y a lieu de continuer l'exploration méthodique de nos sédiments alpins, mais en se plaçant à un point de vue nouveau, déjà exposé [18]. Les résultats nettement négatifs ont une valeur intrinsèque. L'expérience acquise dans les Alpes-Maritimes nous démontre que les problèmes des 3 catégories énoncés tout à l'heure attendront longtemps encore des réponses satisfaisantes et que leur solution, même partielle, dépasse les forces d'un homme, et même celles d'une génération. Loin de vouloir refuser à la géologie historique les services que nos études peuvent lui rendre, nous mettrons nos résultats à sa disposition au fur et à mesure qu'ils se présenteront. Il est trop ambitieux et d'une mauvaise économie de vouloir résoudre par la voie de la lithologie micrographique des problèmes que la rareté des documents paléontologiques pourraient

rendre embarrassants, mais auxquels les méthodes stratigraphiques usuelles permettent de donner une solution mieux que ne pourrait le faire notre trop jeune science, et surtout de façon plus expéditive. La lithologie des roches sédimentaires n'est pas tellement à court de problèmes qu'elle ait besoin d'en emprunter à la stratigraphie. En voici des preuves.

La pétrographie de nos Alpes cristallines et la composition minéralogique de leurs diverses unités structurales commencent, à la suite de recherches nombreuses, à être assez bien connues. Leurs éléments entraînés par les eaux de ruissellement ont été enfouis dans les sédiments dès que l'érosion a commencé à mordre sur les masses plissées, c'est à dire dès leur émersion. L'étude de la répartition des minéraux détritiques dans nos sédiments cénozoïques peut donc nous renseigner sur les phases de l'orogénie alpine. En particulier, la glaucophane semble assez étroitement localisée dans certaines nappes pour que la détermination de ses aires de dispersion à divers niveaux stratigraphiques permette d'obtenir des conclusions d'une précision intéressante.

Les questions de géologie dynamique ne sont pas les seules que nous puissions aborder avec espoir de succès. Sans nous arrêter à l'énumération des tâches qui nous incombent naturellement, — telle l'étude des roches confondues sous le nom d'argiles et qui renferment souvent bien autre chose que des silicates d'alumine hydratés, — nous insisterons sur la perspective qui s'offre à nous d'avoir à explorer de vastes régions inconnues dans le domaine de la lithogenèse et sur l'effort à fournir pour scruter une foule de phénomènes géochimiques déjà baptisés et qui sont un peu comme ces régions de la lune dont nous ne connaissons que le nom.

On a appelé *diagenèse* l'ensemble des modifications physiques et chimiques éprouvées par un sédiment depuis le moment de son dépôt et qui ont pour effet de le transformer en pierre; les facteurs de ces modifications sont toutes les causes actuelles (durcissement, cimentation, émersion, dissolution de sels, *etc.*), à l'exclusion des agents de métamorphisme.

Parmi les termes qui figurent dans cette définition, il en est peu qui évoquent un ensemble de faits bien connus;

certains d'entre eux aboutissent à de vulgaires tautologies. Nous y trouvons une allusion à des *modifications chimiques* dont aucune n'est citée parmi les causes actuelles énumérées.

La lapidification d'un sédiment est tout autre chose qu'un durcissement par simple agglomération; les recherches déjà faites sur ce sujet ont montré que les éléments d'une roche se dissocient et s'unissent de plusieurs façons différentes en réagissant les uns sur les autres et que les réactions chimiques qui se produisent sont fonctions de conditions physiques qu'il importera de préciser; que ces éléments ne sont pas les hôtes définitifs d'une strate donnée; qu'ils affluent, qu'ils émigrent, et que les sels alcalins ne sont pas les seuls à se déplacer: la silice et la calcite sont en mouvement et en compétition perpétuelle; elles se substituent l'une à l'autre; elles épigénisent d'autres minéraux, la glauconie, par exemple. Les sulfates alcalino-terreux et le phosphate de chaux sont soumis à des pérégrinations analogues. Les recherches de M. Cayeux nous ont révélé, parmi tant d'autres faits suggestifs, les vicissitudes de l'histoire de certaine roche, calcaire au début, silicifiée par la suite, puis calcifiée de nouveau et en train de se marmoriser; et rien ne prouve que cette évolution soit terminée, car la prise d'un échantillon sur le terrain ne fait qu'interrompre des phénomènes en cours. C'est encore à M. Cayeux que nous devons des démonstrations éclatantes sur le cycle évolutif du fer dans ses minerais oolithiques.

M. P. Kessler [21] insiste avec raison sur l'insuffisance des définitions successives de la diagenèse, déjà retouchées par MM. Lang et Andree. il propose de remplacer ce terme par celui de *métharmose*. Pourtant il semble que le terme de diagenèse puisse rendre encore des services, à condition d'être défini d'un accord unanime et qu'un congrès lui donne force de loi. Le terme de métharmose, heureusement trouvé, aurait pu servir à désigner précisément les phénomènes qui ne sont pas expréssement prévus dans la définition de la diagenèse reproduite plus haut d'après le lexique pétrographique de Loewinson-Lessing. ἁρμόζειν signifiant *ajuster adapter*, le terme de métharmose devrait désigner une *adaptation à des conditions nouvelles*, savoir l'ensemble des modifications polymorphiques et des réactions chimiques qui se produisent dans le sédiment après qu'il a été soustrait au contact direct de l'eau de mer et jusqu'au moment où intervient la désagrégation atmosphérique (Verwitterung). Il appartiendrait à MM Lang, Andree et Kessler de faire des propositions à ce sujet, après entente préalable.

Parmi les réactions chimiques qui se produisent dans les roches sédimentaires, nous avons déjà indiqué une des

plus intéressantes: la synthèse de feldspaths néogènes. Lory [24] a signalé la présence de ces minéraux dans les calcaires du jurassique alpin; Kaufmann [20] les a vus dans divers sédiments de la Suisse centrale; M. Cayeux [9] les a retrouvés dans la Craie du bassin de Paris et prouvé de façon indiscutable leur naissance *in situ*; M. J. de Lapparent les a mis en évidence dans le Trias d'Alsace et de Lorraine [22]. Enfin, les feldspaths néogènes sont aussi répandus dans le Crétacé des Alpes-Maritimes que dans les sédiments mésozoïques des Alpes bernoises, valaisannes et vaudoises. Dans les régions que j'ai explorées, ces minéraux peuvent se rencontrer dans des roches d'âge quelconque, mais la position stratigraphique et tectonique des couches qui les renferment n'est pas indifférente; les gisements où abondent les cristaux authigènes les plus frais et les plus nets sont ceux qu'une érosion récente a dégagés dans le creux des vallées, tandis que les gîtes des stations élevées, mis au jour par une dénudation plus ancienne, ne recèlent guère que des feldspaths déjà corrodés et parfois décomposés.

Or, considérons la définition suivante, que le prof. Grubenmann voulut bien me communiquer récemment: „J'appelle *métamorphisme* l'ensemble des phénomènes capables de modifier de façon essentielle un gîte minéral dans l'un des 3 caractères: composition minéralogique, structure et texture, pris isolément ou simultanément, — à l'exclusion des phénomènes qui se passent à la limite supérieure de la lithosphère.“ — Et maintenant, n'y a-t-il pas lieu de se demander si la synthèse, dans une roche sédimentaire, d'un minéral tel qu'un feldspath ne constitue pas une modification *essentielle* de sa composition minéralogique? En d'autres termes, ne peut-on pas considérer l'apparition du feldspath néogène dans un sédiment comme la première étape de son évolution possible vers l'état de schiste cristallin? Dans cette conception, les phénomènes métamorphiques formeraient une chaîne ininterrompue dont la diagenèse ne serait que le début.

Je ne suis pas seul à soutenir cette manière de voir. M. Cayeux n'a-t-il pas parlé, à propos des minerais de fer oolithique jurassique, d'un métamorphisme général sous-marin? Au surplus, des silicates que l'on s'accordait jusqu'ici à considérer comme l'apanage exclusif des roches

métamorphiques se découvrent dans les roches sédimentaires: une variété de *sillimanite authigène* est signalée par M. J. de Lapparent dans les formations dévoniennes d'Alsace [23]; j'exposerai prochainement de nouveaux arguments militant en faveur de la production *in situ* de cristaux de *tourmaline* dans les calcaires dolomitiques. Pour terminer, je ferai remarquer que le *sphène* (titanite), si fréquent dans les roches éruptives aussi bien que métamorphiques, est à peu près absent des sédiments marno-calcaires, tandis que l'*anatase* s'y montre souvent en cristaux d'une fraîcheur remarquable, adhérant parfois à une gangue qui rappelle le leucoxène.

Conclusions.

L'examen critique des procédés d'analyse des roches sédimentaires conduit à adopter une méthode de désagrégation et de séparation de leurs éléments dont les résultats numériques offrent une précision qui suffit largement aux besoins de la pratique.

Les sédiments actuels ne sont pas strictement comparables aux sédiments fossiles, qui ont subi toute la série des modifications diagénétiques. Les connaissances relatives à ces 2 catégories de formations sont inégalement développées; il semble prématuré de vouloir paralléliser leurs 2 études, et l'on s'expose à perdre beaucoup de temps en voulant s'attacher uniquement à la solution de problèmes de paléoocéanographie. Il ne faut pas négliger de glaner, chemin faisant, les renseignements favorisant les progrès de la géologie historique, mais la lithologie a devant elle son propre champ à explorer: il est démontré qu'un grand nombre de phénomènes mal connus se passent à notre portée. Notre ignorance à leur égard se trahit par l'insuffisance des définitions dans lesquelles nous prétendons les enfermer. Il importe de s'armer de la volonté de voir et de juger par soi-même, de s'arracher à la quiétude des connaissances purement verbales et d'avouer enfin que nous ne connaissons presque rien des transformations diagénétiques, métharmostiques et autres. Leur étude approfondie sollicite les efforts de plus d'une génération de chercheurs; elle amènera forcément ceux-ci à s'occuper des premiers symptômes du métamorphisme, dont la diagenèse ne constitue que la première phase.

Bibliographie.

La liste suivante ne vise qu'à mentionner:

a) les mémoires renfermant des listes bibliographiques étendues;
b) les ouvrages généraux dont la connaissance est indispensable à qui veut se vouer à l'étude lithologique des sédiments;
c) les mémoires spéciaux cités dans l'article précédent.

a) 1. *K. Andree.* Über Sedimentbildung am Meeresboden. Geol. Rundschau III, 1912; VII, 1917; VIII, 1917; XI, 1920.
2. *P. G. H. Boswell.* Some aspects of the Petrology of Sedimentary Rocks. Proceed. Liverpool Geol. Soc. XIII, 1923.
3. *W. Wetzel.* Sedimentpetrographie. Fortschr. der Miner., Krist. u. Petrogr. VIII, 1923.

b) 4. *L. Cayeux.* Introduction à l'étude pétrographique des roches sédimentaires. 1 vol. et 1 atlas. — Mém. Carte géol. France — Paris 1916.
5. *L. W. Collet.* Les Dépôts marins. — Encycl. scient. Doin, Paris 1908.
6. *Hatch* and *Rastall.* The Petrology of the Sedimentary Rocks. — London 1913.
7. *Holmes.* Petrographic Methods and Calculations. — London 1921.
8. *Thoulet.* Précis d'analyse des fonds marins actuels et anciens. Paris 1907.

c) 9. *L. Cayeux.* Existence de nombreux cristaux de feldspath orthose dans la Craie du bassin de Paris. Preuve de leur genèse in situ. C. R. Acad. Sc. CXX, 1895.
10. *Id.* Contribution à l'étude micrographique des terrains sédimentaires. — Mém. Soc. géol. du Nord IV, mém. II. 1897.
11. *Id.* Structure et origine des grès du Tertiaire parisien. Etude des gîtes minéraux de la France VIII, Paris 1906.
12. *Id.* Les minerais de fer oolithique de France. Fasc. I. Ibid. VIII. Paris 1909. — Fasc. II, 1924.
13. *Id.* Notion d'un métamorphisme général sous-marin, etc. C. R. Acad. Sc., t. 172, 1921.
14. *I. Chelussi.* Sulla presenza di minerali caratteristiche in molte roccie mioceniche dell'Italia centrale. — Atti soc. ligustica, Genova 1910.
15. *Id.* Nuove ricerche in roccie terziarie di sedimento. Boll. Soc. geol. Ital., t. 31, 1912.
16. *Id.* Terzo contributo alla petrografia delle roccie terziarie, etc. Ibid., t. 33, 1914.
17. *L. W. Collet.* Recherches sur la glauconie. Proc. R. S. Edinburgh, vol. 26, 1906.
18. *L. Déverin.* Etude lithologique des roches crétacées des Alpes-Maritimes. Bull. serv. carte géol. France, n° 150, t. 26, 1923.
19. *Id.* Analyse minéralogique de quelques sédiments arénacés. Bull. soc. vaud. sc. nat., n° 198, vol. 53, 1920.
20. *F. J. Kaufmann.* Kleine Dolomit-, Quartz- und Feldspathkrystalle in neptunischen Sedimenten. Beitr. geol. K. Schweiz, vol. 24, Anh. II. 1886.

21. *P. Kessler.* Über Lochverwitterung und ihre Beziehungen zur Metharmose (Umbildung) der Gesteine. — Geol. Rundschau XII, 1922.
22. *J. de Lapparent.* Cristaux de feldspath et de quartz dans les calcaires du Trias moyen d'Alsace et de Lorraine. C. R. Acad. Sc. 1920, t. 171.
23. *Id.* Conglomérats et phtanites des terrains dévoniens de la vallée de la Bruche (Vosges d'Alsace). — C. R. Congrès des Soc. Savantes, 1920.
24. *Ch. Lory.* Sur la présence de cristaux microscopiques de feldspath, etc. Arch. Sc. phys. et nat. Genève (3), 16, 1886.
25. *Thiébaut.* Sur la composition des marnes irisées. — C. R. Acad. Sc., t. 175, 1922.
26. *Id.* Recherches sur la composition minéralogique de quelques marnes du Tertiaire d'Alsace. — Ibid., t. 177, 1923.
27 *J. Thoulet.* Sur la lithologie océanographique des mers anciennes. C. R. Acad. Sc., t. 144, 1907.
28. *W. Wetzel.* Sedimentpetrographische Studien. N. Jhb. f. Min., BB. 47, 1922.