

SÉANCE MENSUELLE DU 21 JUIN 1949.

Présidence de M. M.-E. DENAEYER, président.

Le président annonce le décès de M. l'abbé E. MAHIEU, membre effectif depuis 1926, et exprime les condoléances de la Société.

Il présente et fait admettre comme membres effectifs de la Société :

MM. JEAN HEUSCHEN, ingénieur civil des Mines A.I.Ms, 14, rue Émile Vandervelde, à Cuesmes; présenté par MM. R. Marlière et F. Schellinck.

PAUL BAUDE, étudiant, rue de Blaregnies, Aulnois-Quévy; présenté par MM. F. Racheneur et R. Cambier.

PIERRE DOSSIN, étudiant, 24, rue de Liège, à Verviers; présenté par MM. F. Racheneur et R. Cambier.

Divers :

Il est signalé que le Comité International pour l'Étude des Argiles (C.I.P.E.A.) vient d'être créé et qu'il groupe les spécialistes attachés à cette étude, à raison de deux par pays. Le président actuel est M. S. HENIN (France) et le secrétaire M. M. LEPINGLE (Belgique). Les membres désireux d'obtenir des détails sont priés de s'adresser au Secrétariat.

Dons et envois reçus :

1° De la part des auteurs :

9959 *Barbier, R.* Les zones ultra-dauphinoise et subbriannonnaise entre l'Arc et l'Isère. Paris, 1948, 393 pages, 7 planches et 62 figures.

9960 *Cady, G. H.* Shipping Coal Mines on Illinois, 1 feuille, 1947.

9961 *Le Calvez, Y.* Revision des foraminifères lutétiens du Bassin de Paris. — I. *Miliolidae*. Paris, 1947, 45 pages et 4 planches.

- 9962 *Demay, A.* Tectonique antéstéphanienne du Massif Central.
- I. Les grandes lignes de la tectonique antéstéphanienne du Massif Central.
 - II. Relations entre la zone de racines du Lyonnais et les Cévennes septentrionales. — Nappe du Gier.
 - III. Les nappes cambro-siluriennes de la région du Vigan, dans les Cévennes méridionales. Paris, 1948, 259 pages, 6 planches et 2 cartes.
- 9963 *Mortelet, L. et J.* Le Bartonien du Bassin de Paris. Paris, 1948, 437 pages.
- 9964 *Pijls, F. W.* De bodemkartering van Nederland. Deel I. Een gedetailleerde bodemkartering van de gemeente Didam. La Haye, 1948, 116 pages et 35 figures.
- 9965 *Umbgrove, J. H. F.* Structural history of the East Indies. Cambridge, 1949, 63 pages et 68 figures.
- 9966 *Van Liere, W. J.* De Bodemkartering van Nederland. Deel II. De bodemgesteldheid van het Westland. La Haye, 1948, 152 pages, 24 figures, 10 cartes (hors texte).
- 9967 *Vink, A. P. A.* Bijdrage tot de kennis van loess en dekzanden in het bijzonder van de Zuidoostelijke Veluwe. — Contribution to the knowledge of loess and coversands, in particular of the Southeastern « Veluwe ». Wageningen, 1949, 147 pages, 14 planches et 4 cartes.

2° Nouveaux périodiques :

- 9968 *Hambourg. Mitteilungen aus dem Geologischen Staatsinstitut in Hamburg.* Heft 18 (1949).
- 9969 *Porto. Serviço da Republica. Ministerio da Economia. Direcção General de Minas e Serviços Geologicos. Serviço de Fomento Mineiro. Relatório. Anos 1939 à 1946. N^{os} 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12.*

Communications des membres :

L. DE LEENHEER. — *La caractérisation minéralogique des profils pédologiques.* (Texte ci-après.)

P. DE BÉTHUNE. — *Remarques sur l'origine des brèches interstratifiées du calcaire carbonifère.* Le texte de cette communication n'était pas parvenu au Secrétariat au moment de l'impression.

A. LOMBARD. — *Critères descriptifs et critères génétiques dans l'analyse des séries sédimentaires.* (Texte ci-après.)

La caractérisation minéralogique des profils pédologiques (*),

par L. DE LEENHEER.

Professeur ordinaire à l'Institut agronomique de l'État,
à Gand.

Dans le cadre des travaux pour l'établissement de la carte pédologique de Belgique, réalisés avec l'appui de l'Institut pour la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture, il s'est avéré nécessaire de déterminer les propriétés permanentes des différents types pédologiques reconnus. Celles-ci comprennent la composition granulométrique, la réserve en carbonate de calcium, les propriétés physico-chimiques et la caractérisation minéralogique de chaque horizon constituant le profil.

La caractérisation minéralogique n'a pas pour but de préciser l'association minéralogique en vue d'interprétations génétiques, comme on fait en pétrologie sédimentaire; telle qu'elle est réalisée dans l'étude des profils pédologiques, elle se limite à la détermination de la réserve en minéraux altérables, fournisseurs d'éléments biogènes. Son but est donc uniquement agronomique.

La nécessité d'augmenter continuellement le rendement des terres arables pousse les agriculteurs à augmenter les doses d'engrais en se basant dans beaucoup de cas sur les données fournies par l'analyse chimique de leurs sols. On a cependant constaté que des analyses, renseignant un déficit en potasse, se rapportent à des échantillons de sols qui, en place, donnent les mêmes résultats culturaux avec ou sans engrais potassique. Cette anomalie apparente s'explique quand on admet que dans un sol puisse exister une réserve en éléments nutritifs qu'un extrait chimique, tel qu'on l'applique couramment dans les stations pédologiques, ne parvient pas à libérer.

Les travaux récents sur les propriétés sorptives sélectives de la fraction argileuse ont mis en évidence l'avidité avec laquelle

(*) Manuscrit parvenu au Secrétariat le 30 juillet 1949.

certaines argiles retiennent les ions potassium (et ammonium), dont la détermination exacte échappe de ce fait aux méthodes analytiques courantes. A côté de la fraction colloïdale, la fraction sableuse peut également contenir une réserve plus ou moins importante en éléments nutritifs sous forme de minéraux altérables, qui ne peuvent être estimés par les méthodes classiques visant la détermination du besoin en engrais.

Le but de la présente note n'est pas de préciser comment on détermine la totalité de la réserve en minéraux altérables d'un sol (note que nous avons publiée d'autre part) ⁽¹⁾, mais de signaler la technique simplifiée que nous avons adoptée pour les sols de la Belgique.

En principe l'examen minéralogique est effectué sur les échantillons où la fraction sableuse d'un diamètre supérieur à 50 μ constitue au moins 10 % de la fraction minérale du sol. Sur la fraction minérale $> 50 \mu$, libérée, au cours de traitements préalables, de toute la matière organique et des calcaires qu'elle peut contenir, on effectue une séparation de ses constituants minéraux avec une liqueur d'un poids spécifique de 2,68 exactement. La liqueur utilisée est le bromoforme additionné de quelques gouttes d'alcool, dont la densité est déterminée et éventuellement corrigée, immédiatement avant d'effectuer la séparation en fractions légère et lourde. L'opération terminée, la fraction lourde est lavée à l'alcool, séchée et pesée. Son poids, exprimé en ‰ du poids de la fraction minérale $> 50 \mu$, est représenté graphiquement et donne l'indice des minéraux basiques. Du moment que cet indice dépasse 20 ‰ ou 2 %, on examine la fraction lourde au microscope.

Dans les sols belges la fraction lourde dépasse rarement cette limite, et dans les cas exceptionnels où elle fut dépassée, les échantillons provenaient chaque fois d'un horizon gley ou analogue, révélant à l'examen microscopique des grains minéraux chargés de limonite d'une densité supérieure à celle de la liqueur employée, ce qui les faisait passer dans la fraction lourde.

Dans un tel cas l'échantillon doit être traité par de l'acide chlorhydrique bouillant, lavé et soumis à une nouvelle séparation densimétrique.

(1) L. DE LEENHEER, Introduction à l'Étude minéralogique des Sols du Congo belge (*I.N.E.A.C.*, série scient., n° 15, 1944).

Nous n'avons trouvé jusqu'à présent aucun échantillon présentant un indice de minéraux basiques dépassant 20 ‰ après ébullition à l'HCl.

La fraction légère, de poids spécifique inférieur à 2,68, est examinée au microscope polarisant en prenant comme liquide d'immersion un mélange de 5,25 cm³ nitrobenzol et 2 cm³ chlorobenzol dont l'indice de réfraction est égal à 1,544 (ω du quartz). Avec une telle liqueur un préparateur reconnaît facilement les feldspaths potassiques, dont l'indice de réfraction est toujours plus petit, le quartz ($\omega=1,544$) et les minéraux dont l'indice de réfraction est supérieur. Ces derniers sont en général des micas plus ou moins altérés.

La teneur en ces minéraux est exprimée en % de la fraction légère, le pourcentage étant calculé lorsque le total des grains déterminés dépasse 300.

Voici quelques résultats :

1. Région limoneuse.

Profil et horizon	Profondeur	Teneur en sable > 50 μ	Feldspaths potassiques	Autres minéraux
Waterloo				
V. 3/1	0-27 cm	25,8 %	7 %	6 % (4 % biotites).
V. 3/2	27-66 cm	11,5 %	7 %	4 % (3 % opaques).
V. 3/3A	66-150 cm	17,9 %	8 %	4 % (biotites).
Waterloo				
V. 4/1	0-20 cm	59,0 %	6 %	1 (biotite).
V. 4/2	20-46 cm	82,0 %	4 %	2 (biotites).
V. 4/3A	46-150 cm	96,6 %	6 %	10 (8 biotites).
La Hulpe				
V. 69/1	0-37 cm	11,3 %	8 %	5 (1 biotite, 4 opaques).
V. 69/4	75-150 cm	10,5 %	8 %	19 (15 biotites, 4 muscovites).
La Hulpe				
V. 64/1	0-20 cm	13,1 %	8 %	6 (1,5 biotite, 1,5 muscovite, 3 opaques).
V. 64/2	20-43 cm	13,0 %	13 %	9 (1,5 biotite, 3,5 muscovite, 4 opaques).

Pour autant que nous ayons pu l'établir dans cette partie de la région limoneuse, la réserve en minéraux potassiques altérables ne semble pas importante, sans toutefois être négligeable.

2. Région sablonneuse flamande.

Profil et horizon	Profondeur	Teneur en sable > 50 μ	Feldspaths potassiques	Autres minéraux
Eecloo				
20/1	0-24 cm	87,5 %	16 %	2 (opaques).
20/2	24-75 cm	92,5 %	12 %	2 (opaques).
20/3	75-109 cm	97,2 %	15 %	1 (opaque).
20/4	109-124 cm	97,5 %	15 %	1 (opaque).
20/5	124-150 cm	85,0 %	15 %	—
Eecloo				
14/1	0-25 cm	82,0 %	18 %	2 (opaques).
14/2	25-46 cm	82,7 %	17 %	2 (opaques).
14/3	46-67 cm	87,2 %	15 %	—
Eecloo				
24/1	0-22 cm	92,6 %	16 %	—
24/2	22-76 cm	95,5 %	12 %	—
24/3	76-97 cm	96,7 %	16 %	1 (opaque).
24/4	97-120 cm	99,1 %	15 %	1 (opaque).
24/5	120-150 cm	96,0 %	17 %	1 (opaque).
Eecloo				
22/1	0-24 cm	83,6 %	17 %	1 (opaque).
22/2	24-57 cm	81,2 %	13 %	1 (opaque).
22/3	57-72 cm	85,4 %	14 %	18 (opaques).
22/4	72-150 cm	84,3 %	19 %	—

La réserve en minéraux potassiques altérables est relativement importante, surtout étant donnée la teneur élevée de la fraction sableuse. Ce fait pourrait expliquer la fertilité relative de cette terre sablonneuse, qui dépasse nettement les prévisions basées sur les autres propriétés.

3. Région poldérienne (polders du « Veurne Ambacht »).

a) Dans les sols entièrement constitués d'argile lourde (les sols de cuvette), jusqu'à une profondeur de 1^m5, la fraction sableuse > 50 μ est généralement inférieure à 10 %. Pour les horizons où cette teneur en sable dépasse la limite choisie, nous avons trouvé des teneurs en feldspaths potassiques oscillant habituellement entre 14 et 20 %.

Profil et horizon	Profondeur	Teneur en sable > 50 μ	Feldspaths potassiques	Autres minéraux
Lampernisse				
8/1	0-5 cm	20,9 %	14 %	1 (glaucosite).
8/2	5-14 cm	19,4 %	17 %	4 (variés).
Lampernisse				
34/1	0-12 cm	15,2 %	15 %	5 (3 glaucosites, 2 opaques).
Lampernisse				
37/1	0-12 cm	11,3 %	14 %	3 (variés).
37/2	16-31 cm	13,4 %	16 %	6 (variés).

b) Sols des chenaux. — Dans les sols poldériens des chenaux, où le profil comprend un niveau supérieur d'argile lourde et un niveau inférieur nettement plus sablonneux, la réserve minérale sous forme de feldspaths potassiques est sensiblement la même que dans les sols de cuvettes : les teneurs en feldspaths oscillent également entre 14 et 20 %.

Il arrive parfois que le niveau inférieur du profil, qui est nettement plus sableux, soit également plus riche en orthose, comme le montrent les deux exemples suivants :

Profil et horizon	Profondeur	Teneur en sable > 50 μ	Feldspaths potassiques	Autres minéraux
Alveringhem				
93/5	64-95 cm	39,9 %	25 %	4 (biotites).
93/6	95-106 cm	55,6 %	17 %	5 (biotites).
93/7	106-150 cm	74,5 %	25 %	2 (biotites).
Eggewaarts- Kapelle				
111/5	86-107 cm	73,9 %	19 %	4 (biotites).
111/6	107-121 cm	63,6 %	20 %	2 (biotites).
111/7	121-150 cm	86,8 %	45 %	2 (biotites).

Les agronomes se sont souvent demandé pourquoi les agriculteurs des polders marins obtiennent régulièrement de bonnes récoltes tout en négligeant la fumure potassique de leurs terres. Nous croyons que la réserve en feldspaths potassiques explique en partie cette fertilité naturelle.

DISCUSSION.

M. Cambier attire l'attention sur l'importance de la fumure organique, ce qui est confirmé par l'auteur de la communication qui signale qu'à ce moment une étude est faite sur certaines « maladies de structure » des sols des polders marins.

M. Camerman voudrait savoir quelle est la teneur en potasse (K_2O) qui correspond à une teneur en orthose de 20 %.

M. De Leenheer lui répond que la teneur théorique de 17 % de K_2O de l'orthose ne permet pas le calcul de cette réserve nutritive en potasse, étant donné que les orthoses sont déjà plus ou moins altérées et que le texte présenté ne donne pas le pourcentage en la fraction sableuse $> 50 \mu$, qui a été examinée au microscope. A la demande de MM. Camerman et de Magnée, l'auteur complétera son texte en ajoutant les teneurs en sable ($> 50 \mu$) des exemples cités.

M. de Béthune demande si la sorption sélective des micas vis-à-vis de l'ion potassium n'assure pas une régénération des micas du sol. M. De Leenheer lui fait remarquer que la sorption sélective des micas pour la potasse est très grande dans les solutions neutres, mais qu'elle se perd en milieu faiblement acide, la sélectivité des micas pour les ions hydrogènes étant alors beaucoup plus grande.

M. de Magnée voudrait savoir si la sorption sélective des micas pour le potassium peut être généralisée aux autres ions alcalins comme le sodium, ceci en rapport avec les inondations des polders par l'eau de mer.

M. De Leenheer lui répond que la propriété de la sorption sélective n'est pas déterminée par la valence de l'ion envisagé mais par le rayon de l'ion hydraté. Ainsi l'ion sodique à rayon plus grand n'est pas sorbé comme l'ion de potassium.

Critères descriptifs et critères génétiques dans l'étude des roches sédimentaires (*),

par AUGUSTIN LOMBARD.

Dans la nature, il n'y a pas différentes échelles d'observation. Il n'y a qu'un seul phénomène, immense et harmonieux, à une échelle qui, généralement, échappe à l'homme, à cause de la structure de son cerveau, laquelle structure impose le compartimentage arbitraire, le découpage en pièces isolées.

LECOMTE DU NOUY : *L'homme et sa destinée.*

RÉSUMÉ. — *L'examen critique des principales classifications des roches sédimentaires montre qu'il existe de nombreux critères de groupement ainsi que plusieurs points de vue de départ. Il règne de la confusion sur le sens et la portée de ces critères. Ils se ramènent cependant aisément à deux classes : les critères descriptifs et les critères génétiques. Les études modernes de lithologie font intervenir l'analyse quantitative. L'auteur choisit quelques critères descriptifs de valeur générale auxquels on peut attacher un sens génétique simple et indiscutable. Ces critères seront appliqués dans la suite à l'analyse de séries sédimentaires et à la lithologie comparée. Les critères descriptifs concernent la structure des roches, ce qui conduira le plus aisément possible à des synthèses paléolithologiques. Les critères génétiques les plus courants sont basés sur le milieu aqueux. Afin de les enchaîner par un lien logique, l'auteur reconstitue un cycle de sédimentation en fonction du cycle de l'eau. Le groupement des roches est finalement établi d'après les critères : clastiques - ciment - organismes, auxquels sont subordonnés les autres critères descriptifs. Il se dégage de ce classement une filiation des grands types de roches sédimentaires, filiation que confirmera l'analyse de séries naturelles.*

CHAPITRE PREMIER. — INTRODUCTION.

Préface.

L'objet de ce travail est bien délimité. Il doit servir de cadre à des recherches de lithologie comparée et à l'analyse de séries sédimentaires. Ces séries comprennent des superpositions et des juxtapositions de roches. Il est donc naturel d'analyser les

(*) Manuscrit remis à la séance.

roches pour elles-mêmes avant de passer à leurs associations. Toutefois, il est curieux de constater l'absence presque totale de critères d'ensemble, les recherches se limitant en général à un groupe de roches. Parmi ces critères, les uns sont basés sur l'observation directe et décrivent tel caractère de sa composition; les autres ont trait à l'origine de la roche ou à sa formation. Ils sont par cela même déjà grevés d'une certaine part d'hypothèse. Il faut donc en faire une étude critique et ne conserver que ceux qui sont directement utilisables aux fins définies ci-dessus.

1. Diverses classifications. Leurs critères.

Il règne un déséquilibre dans les classifications. Celles-ci sont faites tantôt de manière logique et suivant une systématique stricte qui permet de grouper les roches selon certaines propriétés constantes, tantôt de façon partielle donnant la préférence à une catégorie, par exemple aux roches clastiques ou aux biochimiques et chimiques. Certains auteurs renoncent à faire intervenir un système *fermé* et préfèrent un groupement *ouvert*, suivant les affinités chimiques, mécaniques ou organiques. Dans bien des cas, il y a confusion dans l'emploi des critères de classification. Les critères génétiques voisinent avec ceux d'un caractère purement descriptif et les deux notions sont fréquemment mal comprises. Une revue critique des principales classifications permettra de confirmer ces remarques. Par la même occasion, les critères descriptifs se dégageront avec leur valeur objective sûre qui sera mise en valeur. On verra que, pour beaucoup d'entre eux, il est possible de leur attribuer d'emblée un sens génétique satisfaisant.

2. Points de vue absolus et relatifs.

Jusqu'à ces dernières années, les classifications ont presque toutes été entachées d'un grave défaut qui les a rendues inapplicables à l'étude des séries naturelles. Elles ont été faites d'un point de vue abstrait et trop absolu, qui considère une roche comme une entité et non comme une partie d'un tout. Les observations sont généralement faites à l'échelle de la coupe mince, plus rarement au-dessus, si bien qu'on oublie que tel calcaire, grès ou silex n'est qu'une étape dans une formation continue, qu'il est donc précédé et suivi d'un autre calcaire, grès ou silex quelque peu différent, rarement sem-

blable. Chaque roche apparaît ainsi faussement considérée comme un type pur et isolé. Une exception est généralement faite dans la classe des roches détritiques, où l'on tient compte de la granulométrie des constituants clastiques, ce qui permet un premier ordre de classement.

Il faut reconnaître qu'il n'est pas de classification sans simplification et que toute simplification déforme la réalité. C'est dire que l'on se heurte à un obstacle inévitable en tentant des groupements. Mais si cette étape de recherches a été nécessaire jusqu'ici, même avec ses imperfections, il conviendrait de chercher à la dépasser en faisant intervenir des notions de filiation, notions qui ne sont pas abstraites mais résultent d'observations sériées sur le terrain. On verra à ce sujet la tentative de KRYNINE (35) et nos conclusions.

3. Échelles du détail et des ensembles.

Cette optique particulière des classifications a mené à une impasse. De l'étude absolue des roches on n'a pas pu passer logiquement à celle des associations relatives, ni à l'analyse des successions en verticale et en horizontale, ni à ce qu'on appelle les *séries sédimentaires*. La stratification des alternances et les successions récurrentes sont considérées comme des cas particuliers, alors qu'ils font partie d'un même processus sédimentaire. Il semble que plus l'échelle du problème est étendue aux ensembles, plus on s'éloigne des bases classiques. C'est inévitable, étant donné leur caractère cloisonné et absolu déjà relevé; elles ne peuvent s'étendre aux séries naturelles où tout est enchaîné et relatif. On s'aperçoit de cet hiatus en parcourant les travaux de lithologie stratigraphique et de paléogéographie. Dans les ensembles, le manque de définitions descriptives est caché par des définitions génétiques, ce qui n'est qu'une solution de facilité. On substitue à des termes descriptifs ceux de nature génétique tels que : facies de transgression, série continentale, complexe orogénique, remplissage de fosse (et je choisis les meilleurs), dont plusieurs induisent nettement en erreur, telles les nombreuses appréciations sur la profondeur d'un dépôt ou sur celle d'un bassin sédimentaire et ses phases d'enfoncement ou d'immersion. On peut se demander un instant s'il existe réellement un changement d'ordre de phénomènes entre les deux domaines, tel qu'il en existe entre la physique nucléaire et la physique classique. Je ne le crois

pas et ce changement n'est qu'une apparence due précisément à des méthodes et à des points de vue différents. Il sort du cadre de ce travail d'en faire la démonstration. Mais les relations évidentes entre les particules minérales et les organismes formant la roche, d'une part, et celles des ensembles formant des couches avec leurs faunes, de l'autre, sont connues de quiconque a passé du microscope à l'affleurement et de l'affleurement aux grands ensembles.

4. Diverses classifications et leurs critères.

Il n'est pas possible de classer logiquement des matières aussi complexes et multiples que les roches sédimentaires sans définir les facteurs ou critères qui seront employés pour les grouper. On entend par *critère descriptif* d'une roche un caractère déterminant défini par l'observation directe, objective et vérifiable. Il s'applique à un ou à plusieurs éléments de la roche et s'exprime qualitativement ou quantitativement, numériquement et graphiquement.

On entend par *critère génétique* d'une roche, un caractère déterminant ayant trait :

- a) à son origine;
- b) à son milieu et à son mode de formation;
- c) à son milieu et à son mode de transport;
- d) à son milieu et à son mode de dépôt, et enfin
- e) à sa consolidation et à ses transformations métasomatiques.

Ces critères sont d'ordres chimique, physique, mécanique, biochimique et physico-chimique. Un critère génétique se rapporte à un ou à plusieurs états qui ont précédé le stade actuel de formation de la roche. Il se déduit avec plus ou moins de sûreté des critères descriptifs. On distinguera les critères génétiques *sûrs*, ceux sur lesquels un commun accord peut se faire et ceux qui sont *incertains*. On voit combien ce caractère génétique *sûr* ou *incertain* est soumis à l'appréciation subjective. Il semble, en géologie, que la meilleure preuve de la justesse d'un critère est l'accord commun qui se fait parmi les géologues pour l'accepter. En effet, comment procéder autrement..., dans un domaine à tout jamais passé, dont les seuls témoins qui subsistent sont condensés en ordre parfois confus

et qui échappent à la vérification expérimentale ? Il reste alors la vérification statistique, celle qui se base sur l'expérience du terrain, sur les observations répétées et confirmées par le plus grand nombre d'observateurs.

Une roche sédimentaire est la résultante de nombreux facteurs. Un certain nombre se sont inscrits, d'autres ont disparu. Parmi ceux qui subsistent, nous cherchons à analyser leur sens, mais une grande part en est encore indéchiffrable. De plus, la lapidification et la diagénèse ont oblitéré la matière primitive, sa composition et ses organismes.

La difficulté dans le choix et dans l'application de critères de classification vient de leur grand nombre d'abord, puis du fait qu'ils se recouvrent et se recourent. Étant obligé de choisir, on ne peut tous les prendre. Il faut en éliminer et ne retenir que ceux qui conviennent dans la classification, laquelle sera chimique, structurale, génétique, etc. Si elle est générale, il faudra se résoudre à de grandes simplifications qui éloignent toujours l'objet classé de la réalité. Le spécialiste, par contre, aura l'avantage de choisir des critères strictement adaptés à son domaine. Ses analyses gagnent en précision, de même que son classement.

Quelques exemples vont montrer les critères utilisés et les résultats obtenus.

CHAPITRE II. — CLASSIFICATIONS QUALITATIVES DES ROCHES SÉDIMENTAIRES.

Classification de L. Cayeux, 1987 (12).

L'auteur, renonçant à une classification rationnelle, rassemble les roches par groupes. Ce dispositif est infiniment souple et permet de mettre certains critères en valeur. On perd, par contre, l'enchaînement des groupes et leurs relations.

Pour bien classer les roches carbonatées, il faudrait disposer de critères semblables à ceux des roches siliceuses, basés sur l'origine : détritique ou organique-chimique, et qui ont la valeur de critères descriptifs. Or, l'élément détritique dominant dans les calcaires, ce sont les organismes : entroques, petits et grands foraminifères, etc., ce qui conduira l'auteur à former le groupe des *roches organo-détritiques*. Elles sont constituées aux dépens d'organismes divers, remaniés et déposés. Ce critère est descriptif et génétique. Il a une grande valeur systématique.

Les anciens auteurs partageaient de 3 notions distinctes pour classer les roches calcaires :

1. La composition minéralogique. Les minéraux sont mêlés sans distinction de leur forme (clastique, colloïdale ou dissoute) ni de leurs transformations diagénétiques (cristallisation du ciment, concentrations de silice, granules de glauconie secondaire).

2. La nature des organismes. Ceux-ci sont pris dans l'ordre systématique général, sans tenir compte de leur écologie.

3. Les structures. Ce terme est pris dans le sens le plus large, s'étendant même trop loin, puisqu'on trouve dans ce groupe des termes qui n'ont rien à y faire, comme les calcaires magnésiens et les cipolins.

L. CAYEUX regroupera les roches carbonatées en se basant sur leur composition chimique en premier lieu, puis sur leur structure. Cette disposition est capitale, car elle est purement descriptive et s'étend à tous les groupes de roches sédimentaires.

Pour les roches siliceuses, l'auteur reprend à nouveau :

1. La nature des minéraux prédominants et celle des organismes.

2. La structure.

Ici encore, les critères sont purement descriptifs, valables micro- et macroscopiquement. On arrive à un inventaire bien ordonné, quoique théorique et cloisonné. L'abondance et la richesse des observations de l'auteur alourdissent l'ensemble, qui perd ainsi une certaine valeur systématique. « ... en bonne logique, cette étude doit servir de couronnement à l'analyse détaillée des matériaux constituants. Elle doit suivre et non précéder. »

On ne saurait mieux en montrer l'esprit et les intentions.

Classification de J. E. Marr, 1905 (36).

Elle n'appelle guère de remarques, car elle suit les lignes de l'étude classique et normale des roches sédimentaires. L'auteur préconise l'emploi de divisions stratigraphiques dans des séries complètes. Il les double de la description des facies et montre la dépendance des divisions stratigraphiques et lithologiques.

On aura des critères paléontologiques, d'une part, et lithologiques, de l'autre, tous deux descriptifs. Aucune allusion n'est faite aux conclusions d'ordre géologique que l'on pourrait en tirer. Cette attitude résume bien l'état des idées à cette époque où l'on n'avait pas encore coutume d'appliquer les données du laboratoire aux recherches de terrain.

Classification de J. Geikie, 1910 (25).

Le critère dominant est *l'origine* des sédiments, laquelle est divisée en 3 : a) mécanique; b) chimique; c) organique. En fait, il ne s'agit pas uniquement de l'« origine », mais plutôt du mode de formation pour a) et c), et d'un terme d'acceptation très vaste et indéfinie pour b). Au point où en sont les recherches actuelles, on préciserait en termes plus exacts s'il s'agit du milieu d'origine, du matériel d'origine ou des agents de destruction.

Les termes *mécanique* et *organique* sont descriptifs et génétiques, ce qui en fait des critères généraux utiles. Toutefois, dans les sous-groupes, les critères vont devenir confus.

En voici une brève analyse :

a) La classe mécanique est divisée en :

1. Subaérien-éolien, terme qui caractérise un agent et un milieu d'attaque, de transport et de dépôt.

2. Sédimentaire, terme aussi général et imprécis que *chimique*.

3. Glaciaire, désignant un agent d'érosion, de transport et un milieu de dépôt.

b) La classe chimique groupe sans ordre défini les roches autres que les clastiques : calcaires, silex, dolomies et sulfates.

c) La classe organique groupe également sans ordre défini les roches résultant de la destruction des organismes.

Dans son ensemble, cette classification est un groupement descriptif de roches plutôt qu'une classification logique. Elle s'arrête aux grandes classes et ne donne que des critères généraux, sans insister sur les relations de composition ou de genèse.

Classification de A. W. Grabau, 1913 (27).

Son auteur va s'efforcer de donner un caractère cohérent et raisonné à sa classification en introduisant des néologismes

parlants. Il obtient ainsi un grand nombre de petits groupes qui se suivent sans s'enchaîner et ne peuvent se réduire en un tableau synoptique.

Les roches organiques et chimiques (biogénic) passent au premier rang, puis viennent celles qui sont formées dans l'eau (hydrogénic). Viennent ensuite les caustobiolithes, les acaustobiolithes, les biolithes, les liptobiolithes, chaque terme étant défini par son étymologie. A ces critères descriptifs s'ajoutent les textures (aux sens micro- et macroscopique du terme pour A. W. GRABAU), qui s'appliqueront aussi bien aux roches monolithiques (oolithiques, fibreuses) qu'hétérolithiques (formées de l'association de deux roches : grès rubané, par exemple).

Hydrolithes et biolithes sont encore subdivisées, suivant leur composition chimique, en *a*) alcalines; *b*) calcaires; *c*) siliceuses; *d*) ferrugineuses, et *e*) carbonates. Jusqu'ici, ces roches non clastiques sont définies par des critères descriptifs. Plus loin, par contre, les roches clastiques vont être subdivisées d'après leur origine, l'auteur accordant un sens très large à ce mot. Il introduit la curieuse notion de *sables non clastiques* comprenant les sables de fonte de neige et les sables de lapilli, notion dans laquelle intervient une idée génétique qui s'ajoute au critère descriptif-génétique *non clastique*.

Le groupement des roches par composition semi-chimique proposé par GRABAU est tombé en désuétude, sauf chez certains auteurs nord-américains chez lesquels on retrouve encore les termes de calci- et silicilutites, termes donnant simultanément la composition chimique et granulométrique (PETTJOHN, 42).

Les hydroclastiques sont divisées en sous-groupes suivant leur composition chimique : hydrocalcirudites, hydrosilicirudites, etc., sans qu'il soit mentionné si ce sont les éléments clastiques ou le ciment qui sont désignés par le terme. Plus loin, on a les atmoclastiques et les anémoclastiques.

Dans son ensemble, cette classification est une des plus complètes connues. Elle présente les roches par groupes suivant des affinités descriptives et génétiques : facteurs de désagrégation, rôle des organismes, présence de l'eau dans la formation. Dans le détail, l'inventaire est très minutieux, mais il fait perdre de vue les grandes lignes. On ne pourrait pas suivre ce système et l'appliquer à une analyse comparée de roches dans les séries naturelles. Il faudrait un regroupement.

Classification de A. C. Trowbridge, 1914 (49).

Cette classification est largement inspirée par des principes actualistes. Le point de départ se trouve dans l'analyse des phénomènes de la sédimentation actuelle d'où l'auteur tire des critères descriptifs-génétiques. Il les applique aux séries anciennes, franchissant avec prudence le grand saut qui sépare les premières des secondes. Ces critères sont : les agents de transport et les milieux de dépôt actuels.

Les sédiments actuels sont groupés suivant les agents suivants :

1. Eolien.
2. Fluviatile.
3. Pluvial.
4. Talus. — Ici le talus est en fait un milieu de dépôt.
5. Glaciaire :
 - a) till;
 - b) fluvio-glaciaire.
6. Lacustre :
 - a) phase près de la côte;
 - b) phase d'eaux calmes.
7. Marin :
 - a) dépôts d'eaux peu profondes :
 1. zone d'agitation majeure;
 2. zone d'agitation mineure;
 - b) dépôts d'eaux profondes.

Dans la division des dépôts marins, la division bathymétrique est très souple, indépendante des critères *littoral* et *pélagique*, et met en valeur la notion d'agitation des eaux. On regrettera toutefois ce dernier caractère purement génétique qui n'a pas de valeur générale dans les séries sédimentaires. Plusieurs dépôts d'eaux agitées cités par l'auteur pourraient être dus à d'autres causes : tremblements de terre. glissements sous-lacustres. Enfin, on ne voit pas la relation entre l'agitation des eaux et la clasticité des roches, ni entre leur granulométrie, leur hétérométrie et leur hétérogénéité.

Classification de E. Kayser, 1923 (31).

Les roches sont groupées par mode d'origine (Entstehungsweise) au sens le plus large du terme allemand. Les grandes classes sont :

1. Les sédiments mécaniques, avec les roches clastiques ou de débris.
2. Les sédiments chimiques, avec les roches de précipitation.
3. Les sédiments organiques, avec les roches organogènes.

Grâce à une extension très large des définitions, les critères génétiques employés par l'auteur deviennent des critères descriptifs et les deux notions se confondent. Prenons un exemple : le terme *mécanique* s'applique au facteur de désagrégation de la roche originale. Par extension, il devient synonyme de *clastique*, critère descriptif d'une roche formée de débris avec ou sans ciment, avec ou sans organismes. Le terme *chimique* est très vaste et s'applique aussi bien aux facteurs génétiques agissant dans divers milieux (agents de transport et milieu de dépôt) qu'à la description des roches qui en résultent. La même remarque s'applique au terme *organique*. Finalement, on s'aperçoit que cette classification ne donne qu'une très première approximation du groupement des roches, d'autant plus que dans le travail en question elle n'est suivie d'aucun groupement plus complet.

Classification de F. Rinne, 1928 (44).

Cette classification rappelle la précédente par ses grandes classes descriptives-génétiques. Les groupes de roches sont cependant plus hétérogènes. Il faut toutefois tenir compte du fait que l'auteur groupe les roches en fonction d'une description plus qu'il ne cherche à les incorporer suivant un système rationnel. A la tête des grands groupes on trouve :

1. Le terme *détritiques*, qui concerne le mode de désagrégation;
2. Celui de *précipitation*, qui est lié au processus de dépôt;
3. Celui de *carbonées*, donnant une composition chimique de la roche actuelle (à laquelle s'adjoignent les schistes bitumineux, le gaz naturel et l'ambre !), et
4. Celui de *diverses*. On voit quelles significations hétérogènes sont attribuées aux critères, puisque 1 et 2 sont génétiques et 3 est descriptif. Les divisions d'ordre inférieur sont plus homogènes. Elles sont descriptives avec le critère de granulométrie pour les détritiques et celui de composition chimique pour 2.

Classification de W. H. Twenhofel, 1932 (50).

Partant surtout du point de vue d'une description des roches, l'auteur insiste peu sur leur classification rationnelle ou synoptique. Il pose, par contre, un principe fondamental (*op. cit.*, p. 186) : « ... There are all gradation between every variety of

sedimentary products and all others ». D'où il tire la conclusion : « This makes classification difficult and any dividing lines erected must be purely arbitrary ».

Voici qui va permettre l'approche des analyses de séries naturelles et celle des nombreux types intermédiaires, ceux que l'on rencontre infiniment plus souvent que les types simples. Une bonne méthode de classement pour l'auteur est celle qui se base sur les *agents de transport* (l'auteur devrait dire *de dépôt*). Ainsi, les sédiments sont classés comme ayant une origine mécanique ou chimique, cette dernière étant à son tour subdivisée en organique et inorganique. Il y a un inconvénient : cette subdivision est souvent difficile, sinon impossible, à faire dans les roches anciennes. L'auteur le reconnaît, mais ne l'estime pas suffisant pour renoncer à s'en servir. Les bases sont donc génétiques, ce que démontre, par exemple, l'emploi du terme : *sédiment mécanique*. Mais ce terme équivaut à *clastique*, lui-même terme descriptif. Les critères sont donc descriptifs-génétiques. On objectera que les agents mécaniques ou chimiques ne sont pas seulement des agents de dépôt, mais de destruction et de transport. Ici encore, l'accord est tacite sur ces termes et cette imprécision consentie allège la systématique. Dans la classe des roches chimiques, les subdivisions sont également chimiques, avec une discrimination des facteurs organiques-inorganiques pour chaque groupe. Les roches calcaires sont subdivisées d'après leurs fossiles suivant un ordre systématique. Parmi les calcaires construits, les types et les exemples sont choisis dans les dépôts actuels, ce qui rend difficile le parallélisme avec les roches anciennes et leur ciment.

Classification de M. G. Filipesco, 1934 (22).

Il s'agit ici d'un tableau synoptique dont les entrées sont :

1. La nature chimique du matériel sédimenté (critère descriptif).
2. Les facteurs qui ont contribué à l'accumulation de ce matériel (critère génétique).

Le point faible de 1 se trouve dans son imprécision. Les roches silico-alumineuses (clastiques fines) voisinent avec les ferrugineuses (dia- ou épigénétiques) ou les salines (précipité salin).

Dans la deuxième catégorie, les subdivisions sont : roches biogènes, chimiques ou biochimiques et mécaniques, qui conviendront à des types simples mais prêteront à des confusions dans de nombreux cas intermédiaires, notamment dans les calcaires formés de débris d'organismes, les grès à pâte calcaire et à foraminifères, les dolomies gréseuses, etc.

Parmi les roches *biogènes* on trouve les spongolithes, qu'on rangerait plus volontiers avec des calcaires à débris d'organismes. Le caractère dominant est l'accumulation mécanique de spicules flottés, ce qui fait strictement de la roche un dépôt détritique. Une roche « biogène » *sensu stricto* est uniquement construite. C'est le cas des polypiers et de leurs récifs. On s'aperçoit des insuffisances de ce type de nomenclature dès que l'on quitte la roche typique et riche en débris pour passer latéralement, sans discontinuité et sur quelques centimètres souvent, à des parties moins riches en organismes. De ce fait, cette même roche n'est plus considérée comme *biogène* par l'auteur, mais devient un calcaire ou une masse qu'il versera dans un autre groupe. L'exemple peut être appliqué à d'autres types d'organismes et illustre les inconvénients et les points faibles des systèmes étanches. Le tableau est compliqué et subdivisé, fort adroitement d'ailleurs, en de nombreux compartiments qui en rendent la lecture difficile.

Classification de P. Niggli, 1935 (38 et 39).

Dans un préambule, l'auteur précise les enchaînements de facteurs génétiques actuels et valables dans le passé. L'enchaînement des critères génétiques aux critères descriptifs est ainsi clairement établi. Une série de tables montre la transformation des principaux minéraux sous l'effet des agents chimiques, puis la classification granulométrique des roches détritiques, les propriétés physico-chimiques de minéraux de roches non-consolidées et leur vitesse de sédimentation. Ce sont autant de classifications partielles qui classent sous des aspects divers les dépôts détritiques anciens et actuels. Ce domaine particulier des roches sédimentaires clastiques se prête bien à une classification granulométrique Il suffit, pour le confirmer, de citer ici d'autres tentatives antérieures ou postérieures à celle de NIGGLI : ATTERBERG, 1903-1905; CROOK, 1913; UDDEN, 1914; BOSWELL, 1918; WENTWORTH, 1922; HATCH and RASTALL, 1923; FISHER, 1933; BARTH, CORRENS et ESKOLA, 1937; HOLMES et TRASK, 1932; ALLING, 1943,

qui toutes marquent une tendance à la classification quantitative d'un groupe de roches sédimentaires. L'auteur ajoute ensuite de nouveaux critères descriptifs, obtenant ainsi des groupes naturels mais isolés où seuls figurent certains types de roches. Ces critères sont le ciment, le matériel détritique, les dimensions des clastiques et l'état consolidé ou meuble de la roche.

Enfin, ce qui nous intéresse ici plus particulièrement, c'est le groupement par associations sédimentaires qui correspondent à de larges provinces paléogéographiques. Citons-les, sans d'ailleurs insister sur leurs constituants bien connus des spécialistes :

1. Type alpin diluvial.
2. Type du Permo-Trias germanique.
3. Type molassique ou paraliqé.
4. Type épicontinental cyclique.
5. Type du flysch ou type géosynclinal.
6. Type océanique de mer profonde.

Ce dernier type, remarque l'auteur, est connu actuellement, mais est pratiquement ignoré dans les séries anciennes.

La tentative est intéressante et part d'un point de vue actualiste et relatif méritant d'être poursuivi. Toutefois, chaque catégorie est trop vaste et renferme un grand nombre de types de roches dont certaines sont communes à plusieurs classes. Elle ne vaut donc que pour les ensembles. L'introduction de critères secondaires (dont les organismes) donnerait un bon module d'analyse de séries naturelles. On trouverait notamment l'expression des termes de passage d'une province à l'autre, comme, par exemple, du type 3 au type 5, de 5 à 4, de 3 à 1 et de 2 à 4, qui sont connus actuellement et dans le passé, en verticale et en horizontale. Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point.

Classification de F. H. Hatch, R. M. Rastall et M. Black, 1938 (29).

Les prémisses de cette classification sont actualistes et génétiques. Les auteurs admettent trois grands milieux de dépôt : le milieu continental, le milieu intermédiaire (deltaïque et estuarien) et le milieu marin. Le climat joue son rôle, lequel s'inscrit dans les grandes zones climatiques actuelles.

Les critères de classification les plus satisfaisants sont ceux du milieu de sédimentation. Ici les auteurs se basent sur la genèse des roches. Des divisions secondaires seront réservées pour la composition minérale et organique, les textures et les structures. Une large part est « ... based upon the material out of which the sediments were formed ». Cette phrase, extraite du texte original, prête à un malentendu, car « were formed » implique le passé et concerne dans ce cas le matériel cristallin ou sédimentaire qui est la source des sédiments. Il semble plutôt que les auteurs, sous cette définition, entendent écrire « are formed » au présent, critère descriptif. En effet, leurs subdivisions sont :

1. Dépôts clastiques ou fragmentaires.
2. Dépôts chimiques.
3. Dépôts organiques.
4. Dépôts pyroclastiques.
5. Dépôts résiduels.

On remarquera toutefois le choix judicieux de ces termes qui sont descriptifs-génétiques et se rapportent aussi bien à la roche telle qu'elle est observée qu'à son mécanisme de formation. On remarquera au passage que 4 pourrait être groupé sous 1, dont il n'est qu'un cas particulier.

Les sédiments ferrifères figurent à la suite des sédiments argileux dans le groupe des clastiques. Cette attribution n'est pas expliquée par les auteurs, mais elle se justifie génétiquement et se vérifie dans les séries naturelles. Le fer vient des continents sous forme dissoute et se dépose plus lentement, plus tard et plus loin que les colloïdes de type argileux.

Les calcaires sont divisés en 1° organiques (critère descriptif-génétique); 2° précipités (critère génétique) et 3° clastiques (critère descriptif-génétique). Dans le deuxième groupe, les types de calcaires sont souvent choisis dans les exemples actuels, alors que les exemples anciens sont trop rares. Dans le troisième groupe, on a rassemblé les conglomérats calcaires et les calcaires remaniés. Cette attribution est juste si l'on considère la composition chimique de la roche, ainsi que le font les auteurs. Mais on pourrait aussi admettre que ces calcaires sont des dépôts clastiques dont les éléments sont pris sur place ou pas loin. Leur formation s'apparente alors aux roches fragmentaires;

leur signification paléogéologique devient d'emblée plus claire. On voit une fois de plus l'importance du choix d'un critère et l'influence du point de vue dans la classification. Les dépôts siliceux sont classés par organismes : spongiaires, radiolaires, diatomées. Ce sont des critères descriptifs-systématiques qui impliquent une genèse géographique.

Les charbons sont des formations complexes qui sont classées ici sous deux critères descriptifs : 1° les débris végétaux figurés et 2° la composition chimique exprimée par le pourcentage en matières volatiles et le pourcentage de carbone fixe. Ce sont tous deux des critères descriptifs. Les pétroles, l'asphalte et les schistes bitumineux sont indépendants du charbon et forment un groupe à part.

Il n'est pas possible de reprendre les détails de cette importante synthèse, mais on remarquera combien l'exactitude des critères employés contribue à grouper logiquement les roches, sans prendre de caractère trop schématique.

Classification de J. Bourcart, 1941 (5), 1944 (6).

D'un caractère pratique et simplifié cette classification repose sur des critères descriptifs. Les grands groupes sont : 1° les matériaux meubles; 2° les roches plastiques et 3° les sels et les gels.

Dans 1° on a adopté la classique division granulométrique, puis la composition pétrographique et chimique. Les roches cimentées sont incorporées à ce groupe.

Dans le tableau, les colonnes verticales sont :

1° Les roches non cimentées et cimentées, puis les roches calcaires cimentées par du calcaire. Ces trois groupes ne s'appliquent qu'aux roches détritiques.

Dans les lignes horizontales, on trouve les divisions de :

- 1° roches détritiques (critère descriptif-génétique);
- 2° plastiques (critère descriptif);
- 3° les roches dues au dépôt de produits solubles ou pseudo-solubles (critère génétique);
- 4° roches dues à l'accumulation de produits organiques (critère descriptif-génétique).

A propos de sédiments modernes de la Manche, l'auteur groupe plus qu'il ne classe. Il utilise des critères descriptifs-

granulométriques pour les classes de premier et de deuxième ordre. Il ajoute ensuite les propriétés physiques, chimiques, physico-chimiques et hydrologiques.

L'avantage de ce groupement réside dans sa souplesse, qui permet d'utiliser des critères descriptifs non classifiables mais si typiques de ce milieu localisé et spécial.

Classification de P. Fourmarier, 1944 (23).

L'auteur groupe les roches sédimentaires ou exogènes d'après les critères suivants : *a*) solides, *b*) colloïdales, *c*) dissoutes, critères se rapportant à l'état physique de la roche pendant son transport de son lieu d'origine à son lieu de dépôt. Ce sont donc des critères génétiques, mais ils ont une valeur descriptive indéniable, puisque cet état physique s'est conservé malgré une transformation plus ou moins grande de la roche. Ce sont des critères descriptifs-génétiques, c'est-à-dire, rappelons-le, ceux qui définissent directement l'origine d'un dépôt à partir de l'observation des éléments de la roche.

Classification de M. Dreyfuss, 1946 (16).

La classification est essentiellement descriptive. Les grands groupes sont établis par granulométrie pour les détritiques, puis par composition chimique pour le reste, sans établir de lien entre les deux classes.

Les roches détritiques sont classées par groupes dimensionnels suivant le schéma classique et le chimisme du ciment sert de base à des subdivisions ultérieures. Un groupe est réservé aux constituants autres que le quartz. Les roches argileuses sont divisées suivant leur dureté et leur schistosité avec des groupes additionnels suivant les composants supplémentaires. La notion fondamentale de séparation entre la pâte et les constituants est utilisée dans chaque grande classe. Dans les roches carbonatées, 3 grands groupes sont disposés d'après le chimisme de la roche. Des subdivisions descriptives utilisent les critères suivants : textures, cassures, organismes, proportion de silice et présence d'argile.

Dans les roches siliceuses non détritiques, l'auteur tient compte dans ses divisions du fait que la silice est en concrétions dans une roche d'autre composition. Cette dernière reste dominante dans certains cas, alors que dans d'autres la silice peut former des bancs entiers.

Les roches salines sont classées sommairement sans subdivision. On remarquera que le terme *salin* est un des seuls qui convienne à ces dépôts anciens, pour autant qu'on s'en tienne à un critère descriptif. Les autres sont génétiques, tels qu'évaporites, roches de concentration, roches de précipité, dépôts lagunaires, etc., sans parler du terme *chimique*, qui est trop vague.

Cette classification apparaît ainsi comme un groupement analytique simple et basé sur des critères strictement descriptifs. A plusieurs reprises, des enchaînements et des termes de passages sont amorcés, ce qui marque un grand progrès sur plusieurs classifications anciennes.

Classification de R. R. Shrock, 1948 (45).

Cet auteur donne une classification simplifiée et générale, accompagnée d'un tableau synoptique. Les deux entrées sont : 1° le mode de formation des particules et 2° la composition et la texture. 1° est génétique mais en principe seulement, car l'auteur groupe sous ce terme les roches *a)* fragmentaires et *b)* précipitées, ce qui est un critère descriptif pour *a)* et génétique pour *b)*. Il concerne le mode de dépôt et non la formation *sensu stricto*. Parmi les roches fragmentaires, une subdivision *partiellement fragmentaire* s'applique aux sédiments actuels. Elle est très hétérogène. Elle devient *partiellement précipitée* dans les roches sédimentaires correspondantes, lesquelles renferment aussi bien les roches ferrugineuses que les siliceuses, le charbon, les calcaires et les dolomies.

La notion de *fragmental* des calcaires, dolomies et roches clastiques s'applique aux organismes dans les roches. La masse de fond est laissée à part. Le terme *graywacke* prend, à la suite de JONES et de KRYNINE, une valeur génétique de roche de série géosynclinale, de même qu'une *arkose*.

Classification de P. D. Krynine, 1948 (35).

Cet auteur apporte une des contributions les plus importantes à la systématique des roches sédimentaires et ses critères vont prendre une valeur comparative nouvelle, tout en restant descriptifs. Il en résulte une classification moins cloisonnée que les autres où apparaît la notion d'un continu dans les séries. Ce continu est divisé en groupes passant les uns aux autres. Plusieurs travaux de détail avaient déjà montré l'application

de ces principes à de petits groupes de roches (voir plus loin les critères quantitatifs), mais il manquait la synthèse.

P. D. KRYNINE tente un regroupement, mais auparavant il définit les critères à partir des principes suivants : toute roche est formée *a*) de constituants et *b*) de l'association de ces constituants. Une troisième propriété des roches sédimentaires est leur *structure*. Une classification objective des roches se basera sur *a*) leur composition, *b*) leur texture, et pour les ensembles de roches elle partira *a*) de leur composition, *b*) de leur texture et *c*) de leur structure, ce terme étant appliqué, contrairement à l'usage, aux grandes unités lithologiques.

La composition des roches résulte de la présence d'éléments principaux et d'éléments accessoires. Il y a des relations entre les constituants principaux eux-mêmes suivant des associations bien définies qui aboutissent à des *petrographic endmembers* ou termes finaux. On peut ramener ces termes finaux de toutes les roches sédimentaires à deux groupes fondamentaux, dont les proportions varient, à savoir :

1. Une *fraction détritique*. C'est le matériel transporté et déposé à l'état solide. Il provient de l'extérieur du bassin sédimentaire (critère géo-génétique) et se trouve composé dans 99 % des cas par des silicates. Sa composition dépend de la composition pétrographique de l'aire d'origine, de l'intensité et de l'efficacité de l'érosion avec quelques transformations pendant le transport.

2. Une *fraction chimique* existant sous forme de solution dans l'eau du bassin et précipitée par les agents biogéniques ou/et inorganiques. Cette fraction est reprise par les courants; il s'y ajoute des coquilles et des débris organiques. Ainsi, malgré une formation chimique, la texture est clastique. Les trois quarts de cette fraction sont des carbonates, le reste est de la silice. D'autres constituants, tels que la glauconie, le fer et le phosphate sont très abondants localement mais rares à grande échelle.

Les roches *détritiques* sont celles contenant 50 % et plus de matériel clastique. Elles sont divisées en trois assemblages minéraux : 1° quartzites; 2° graywackes et 3° arkoses, qui ont un sens génétique bien déterminé dans le schéma de l'auteur. Ces trois critères étant numériquement mesurables, il est possible de les exprimer par diagrammes ternaires dont les sommets sont : 1° quartz-silex, 2° feldspaths-kaolin, 3° micas-

chlorite. On distingue dans les roches détritiques les grains et le liant. Ce dernier est nommé *matrix* lorsqu'il est formé de matière finement granuleuse, et *cement* lorsqu'il est fait d'une masse microgrenue de précipité chimique.

La classification proprement dite des roches sédimentaires est uniquement descriptive. Le critère détritique y participe deux fois, la première en horizontale avec les roches détritiques divisées en trois classes granulométriques, la seconde en verticale avec les trois groupes pétrographiques précités. Ce dispositif, fort ingénieux, permet de faire figurer les roches non détritiques (carbonatées et siliceuses) selon des horizontales auxquelles s'ajoutent occasionnellement les clastiques des colonnes verticales. C'est ainsi que sont incorporées les nombreuses classes intermédiaires de marnes, de calcaires et de dolomies à quartz et micas détritiques jusqu'ici négligées et pourtant très fréquentes dans les séries naturelles. L'auteur donne des diagrammes triangulaires de la composition de quatre groupes de roches. Les sommets sont respectivement pour chaque groupe :

Groupe 1. — Carbonates. Silice II (diagénétique, c'est-à-dire non clastique). Grains de quartz et de silex.

Groupe 2. — Carbonates ou silice II. Micas et argile. Grains de quartz, schiste et silex.

Groupe 3. — Argile et chlorite. Grains de quartz, silex et feldspaths.

Groupe 4. — Carbonates. Argile et kaolin. Grains de quartz et de feldspaths.

Ces analyses spéciales s'encadrent dans les groupements généraux. L'ensemble de cette classification est souple et s'applique de près à l'étude de séries naturelles. Il subsiste toutefois un élément qui mériterait une plus large considération : ce sont les organismes.

Classification de F. J. Pettijohn, 1949 (42).

Cette classification tient compte simultanément de plusieurs éléments, les uns génétiques, les autres descriptifs. Elle est difficile à comprendre, car ces facteurs se recoupent. Comme critères génétiques, l'auteur distingue les clastiques (allogènes), les précipités chimiques et biochimiques (autigènes) et les sédiments de remplacement (épigéniques). Les calcaires ont plusieurs origines : clastique, biochimique et épigénique. D'autres sédiments entrent dans une seule catégorie.

Le facteur *activité tectonique* intervient comme agent du milieu de sédimentation. Il détermine des groupements principaux, à savoir : *a*) la série des orthoquartzites-calcaires; *b*) la série des graywackes et *c*) la série des arkoses. L'ordre adopté est fonction d'une activité tectonique croissante.

Le caractère dominant de cette classification est d'être génétique et de considérer les roches comme liées les unes aux autres suivant des facteurs de genèse simples réduits au nombre de quatre : la granulométrie pour les allogènes, le métasomatisme pour les épigéniques, la salinité pour les autigènes et la tectonique qui englobe à son tour les allogènes et les autigènes.

CLASSIFICATIONS QUALITATIVES D'ENSEMBLES (SÉRIES) DE ROCHES SÉDIMENTAIRES.

Nous avons déjà relevé la difficulté qu'il y a à passer des études relatives aux roches à celles des complexes sédimentaires. Diverses tentatives ont été esquissées dans ce sens et l'on rappellera celles de P. NIGGLI et de P. D. KRYNINE. Les relations de facies et leurs enchaînements sont un domaine qui fait logiquement suite à ce travail, mais il sera laissé de côté pour l'instant.

Classification de P. D. Krynine (*op. cit.*, p. 146).

L'auteur s'occupe des dimensions et de l'extension de certaines couches de roches prises en grandes unités. Il distingue quatre grands types morphologiques :

1. En feuille (blanket), typique des orthoquartzites et des calcaires. Ce sont des sédiments épicontinentaux.
2. Tabulaire, typique des graywackes, dépôts de géosynclinaux.
3. En prisme, typique des arkoses, dépôts orogéniques et de blocs faillés.
4. En lacets (shoestring), apparaît dans les chenaux, les barres et les dunes.

On objectera le caractère schématique de ces volumes et leur manque de ressemblance avec la réalité. L'auteur part de figures géométriques à faces planes et à pans coupés, alors que les formes les plus fréquentes d'unités lithologiques sont lenticulaires, bombées et gauchies, avec toutes les variétés qu'elles peuvent avoir dans leurs proportions.

Classification de W. H. Twenhofel, E. G. Dapples, W. C. Krumbein et L. L. Sloss, 1947 (50, 14, 33, 46).

Dans un groupe d'études parues simultanément, ces auteurs ont tenté de classer certains grands types de roches par milieu de dépôt. C'est un critère descriptif pour les formations actuelles et génétique pour les formations anciennes. Dans ce dernier cas, il paraît bien fragile et son application est prématurée pour l'instant, sauf dans des milieux exceptionnellement simples à analyser, tels que le milieu continental, celui d'eau douce, celui d'orogène, de cratogène et quelques milieux décrits par J. TERCIER. (Voir chap. suivant.)

Ici, les critères adoptés sont 1° les milieux de *plate-forme* et 2° ceux de *bassins*. C'est une première approximation. Pour les *conglomérats*, W. H. TWENHOFEL renonce à les encadrer dans une de ces grandes subdivisions, tant sont nombreux les modes et occurrences de conglomérats sur un continent le long de sa bordure et en diverses autres aires sédimentaires.

Pour les *grès* E. G. DAPPLES retient le critère *plate-forme*, qu'il subdivise en grandes unités lithologiques (blankets et lens-shaped), eux-mêmes divisés en sous-groupes d'associations minérales (quartz-feldspath-potasse, arkose et graywackes, ou encore quartz pur, quartz et glauconie, quartz et fer, etc.). Suivent ensuite des classements accessoires par structures, textures, granulométrie, minéraux lourds, organismes et ciment. Aux grès de plate-forme s'opposent les grès de *bassins*, qui comprennent deux groupes, les arkoses et les graywackes, dans lesquels on retrouve les subdivisions accessoires précédentes. Pour les *schistes argileux*, W. C. KRUMBEIN divise ces roches en deux groupes granulométriques, les siltstones et les claystones, eux-mêmes subdivisés suivant leurs chimisme, structure, stratification, couleur, etc. Ces critères, bien que descriptifs, se recoupent et se confondent. L'auteur les a doublés de critères d'ensemble : épaisseur de complexe et variations latérales d'épaisseur. Il les répartit en plates-formes et en géosynclinaux. Pour les *calcaires*, L. L. SLOSS constate que le critère de tectonique générale utilisé ne peut pas être employé. Ces roches se distinguent par des facteurs chimiques et biochimiques obéissant à d'autres lois. Il tente toutefois d'intégrer les calcaires dans ces grands milieux de plates-formes et de bassins. L'essai n'est guère heureux car il fait intervenir des considérations génétiques de profondeur et d'ouverture de bassin qui sont plus théoriques que réelles.

Cette tentative se heurte à de nombreuses difficultés, entre autres à l'imprécision qui règne encore sur les notions de plates-formes et de bassins, à leur forme, à leur relation avec les côtes et à leur *durée*. Il est probable cependant que ces notions sont applicables à des types de sédiments uniformes et très étendus. On lira à ce sujet la note de L. CAHEN (8) à propos de leur application à des grès du Kundelungu du Congo belge. Pour le reste, les critères demandent à être reclassés en revisant leur importance et leur valeur.

Classification de J. Tercier (48).

Le point de départ de l'auteur est différent de ceux qui précèdent. Les associations naturelles de dépôts marins actuels sont groupées par aires géographiques-génétiques. Partant des séries actuelles, on remonte aux séries anciennes. Il est alors possible de classer les grandes associations sédimentaires selon les divisions suivantes :

1. Milieu de sédimentation *paralique*; type actuel : delta du Mississipi; type ancien : molasses tertiaires périalpines et séries paléozoïques à charbons.

2. Milieu de sédimentation *épicontinentale*; type actuel : Bahamas-Floride; type ancien : Mésozoïque helvétique et jurassien.

3. Milieu de sédimentation *géosynclinale*; type actuel : Indonésie; type ancien : divers types de Flysch.

4. Milieu de sédimentation *océanogène*; type actuel : mal connu, avec des boues et vases colorées, pauvres en carbonates; type ancien : calcaire à Aphychus, jaspes, etc.

Les critères sont génétiques, clairement définis par des exemples actuels et anciens, mais ils seront sujets à des compléments à mesure qu'évolueront les connaissances sur ces divers milieux de dépôt. L'auteur a groupé les roches sédimentaires en les considérant du point de vue génétique général (géographie), qui diffère de l'aspect systématique et lithologique conservé jusqu'ici. Ce qui donne à cette classification son sens original, c'est l'application de critères génétiques et descriptifs non seulement aux roches anciennes, mais aux séries actuelles équivalentes; elle remonte ensuite des formations récentes aux formations anciennes, en faisant intervenir de nombreux facteurs actuels

océanographiques, morphologiques et tectoniques. Elle est cependant limitée aux cas où les sédiments anciens ont leur équivalent actuel, et inversement. C'est la raison qui m'a obligé à reprendre un autre type de répartition des aires sédimentaires.

CHAPITRE III. — CLASSIFICATIONS QUANTITATIVES DES ROCHES SÉDIMENTAIRES.

Ce chapitre est consacré aux méthodes d'analyse quantitative et aux critères descriptifs de classification qui en découlent. Ce domaine s'étend d'année en année, bien qu'il reste encore confiné à un type de roches ou à l'autre, suivant les méthodes employées. On constate pour l'instant une faveur marquée pour l'application des méthodes mécaniques à la granulométrie des matériaux meubles.

CRITÈRES CHIMIQUES.

Les fondements de la classification des roches sédimentaires sont basés sur la composition chimique du milieu d'origine, du milieu de transport et de la roche qui en résulte. Les organismes eux-mêmes jouent un rôle déterminant et l'on rappellera ici que la composition chimique d'un organisme est l'exposant du chimisme du milieu dans lequel il vit, point de vue souvent négligé dans l'analyse de roches sédimentaires et de leurs fossiles.

Les limites de l'analyse chimique sont toutefois rapidement atteintes dès que la roche prend une texture complexe. L'analyse est globale et confond les organismes, les éléments clastiques et le ciment. Elle devient utile pour déceler un élément caractéristique, le fer et la dolomie, par exemple, qui sans cela seraient impossibles à mesurer par une autre méthode.

L'analyse chimique, même qualitative, garde, par contre, sa valeur dans les études théoriques, dans le classement des roches simples et dans les cas où un constituant parmi plusieurs doit être mesuré, sans pouvoir être isolé par une autre méthode. Ajoutons à ce dernier cas les analyses de matière utilisable dans un sédiment : C. H. & O des charbons, phosphate des craies, etc. On la considérera comme une donnée accessoire pour résoudre des cas limités et une auxiliaire de la classification. En fait, son importance a diminué depuis la fin du XIX^e siècle.

A propos des charbons, cependant, l'analyse chimique prend une très grande importance. On lui demande de préciser la teneur en C. fixe, en matières volatiles, en H, en O, en N et en cendres.

A. DUPARQUE (18) distingue l'analyse élémentaire (teneurs en C, O, H, Az, etc.) et l'analyse immédiate (humidité, matières volatiles, C fixe et cendres). Mais ces deux analyses ne sauraient suffire et il faut leur ajouter les critères microscopiques des constituants organiques pour pouvoir classer les charbons.

On sait que d'autres classifications non chimiques reposent sur les composants de la houille (notamment la classification de STOPES en durain-fusain-clairain-vitrain), alors que les classifications industrielles font intervenir des critères physiques et chimiques (chaleur dégagée, matières volatiles).

Classification de Niggli-Becke, 1947 (2).

Ces auteurs expriment les compositions chimiques des roches au moyen du diagramme tétraédrique. C'est la figure schématique la plus complète pour exprimer la composition chimique ou minérale des roches. Les unités sont données en poids moléculaire. Ce mode graphique illustre la variation des composants chimiques des roches cristallines, métamorphiques et sédimentaires.

Suivons CH. S. BACON (2) dans la classification des roches sédimentaires homogènes, sans organismes. Ce sont les anhydrite-bauxite-chamosite-dolomie-glauconie-kaolin, montmorillonite. Les calcaires sont pris avec leurs accessoires principaux non clastiques : magnésie-fer-argile. La plupart des roches se trouvent le long de l'arête Al-C et la teneur en minéraux ferromagnésiens (FM) tend à donner à leur zone une forme arquée dont la convexité est tournée vers le pôle FM.

Il est intéressant de comparer la zone des roches sédimentaires avec celle des roches éruptives. Arkoses et tufs se rapprochent des éruptives. Mais on ne saurait pousser bien loin cette comparaison, qui n'amène à aucune conclusion constructive. L'inconvénient majeur de la classification tétraédrique des roches sédimentaires est l'absence de l'élément silice. Pour y parer, il a fallu ajouter un plan passant par l'arête C-Al. On met en valeur le degré de silicification, qu'elle soit d'origine hydrothermale ou diagénétique.

L'intérêt de cette représentation est très limité, surtout dans les buts que nous nous sommes assignés. On retrouve les inconvénients de la méthode chimique en général avec en outre l'absence des critères structuraux et organiques.

CRITÈRES GRANULOMÉTRIQUES.

Ces critères sont donnés par diverses méthodes, suivant que les roches sont consolidées ou non et formées d'éléments grossiers, moyens ou fins. Les roches cimentées s'analysent au microscope, les autres par divers moyens mécaniques, à sec, sous l'eau, par élutriation, flottation, tamisage. Les méthodes optiques et mécaniques s'utilisent simultanément. Ce qui importe ici, c'est de dégager la valeur des critères obtenus. Elle est indéniable en ce sens qu'elle permet des classements enchaînés et logiques, avec des comparaisons et des déductions aisées à mettre en valeur. Les mesures portent principalement sur :

- la dimension des grains, absolue ou comparée (ou granulométrie globale);
- le pourcentage des grains par catégories numériques ou minéralogiques;
- le classement des grains d'un dépôt (homo- ou hétérométrie);
- la composition lithologique en fonction des dimensions.

Les méthodes granulométriques ont permis des études sur les formations actuelles naturelles. Elles sont souvent doublées de recherches expérimentales qui portent principalement sur :

- le degré d'usure;
- le degré d'arrondissement;
- la morphologie du grain (absolue ou comparée);
- l'usure en fonction du transport (milieu ou agent, distance, mode);
- l'usure en fonction de la composition du grain.

A. CAILLEUX (9 et 10) emploie en outre les critères suivants pour l'étude de formations actuelles graveleuses, fluviales et littorales :

1. Nature lithologique de l'ensemble exprimée en % du nombre des galets.
2. L'aplatissement des galets.

3. La dissymétrie des galets.
4. Les indices d'éroussé des galets.
5. L'inclinaison des galets.
6. L'orientation des galets.

A. VON MOOS (37), dans son étude de quelques grès molasiques, applique les paramètres de P. NIGGLI exprimés en pourcentage du poids total.

Ces paramètres sont :

d = diamètre moyen des grains du mélange total;

d_1 = diamètre moyen de la fraction fine du matériel utilisé pour d ;

d_2 = diamètre moyen de la fraction grossière du matériel utilisé pour d ;

p , p_1 et p_2 : mêmes valeurs, mais exprimées en valeurs cumulatives.

Ces paramètres sont repris par TH. ZINGG (54), qui y ajoute d'autres critères d'un usage moins fréquent. Ce sont : L = facteurs de remaniement; S et H : facteurs différentiels concernant la différence entre le diamètre moyen et un mélange parfait; K = diamètre maximum du plus gros grain.

Ce dernier est souvent utilisé pour un premier classement courant malgré sa très grande approximation. L'auteur mentionne ensuite le degré d'usure et donne diverses définitions qui s'y rapportent.

CRITÈRES MÉCANIQUES, PHYSIQUES-CHIMIQUES ET GÉOTECHNIQUES.

Ces critères dérivent de l'emploi de méthodes très répandues dans le domaine technique. Leurs usages et leurs résultats ont fait l'objet de nombreux travaux dont la plupart ont une valeur d'application pratique. Nous avons déjà parlé des critères granulométriques qui s'obtiennent par tamisage, par hydro-classement et par d'autres procédés analogues. Ce qui nous intéresse plus directement ici, ce sont certaines propriétés des dépôts meubles qui complètent les définitions des sédiments actuels.

J. BOURCART (1941 et 1946) applique ces critères aux *matériaux meubles*, dont les propriétés d'ensemble ne sont pas aussi caractéristiques et évidentes que celles des roches consolidées. Il distingue : l'adhésion des éléments les uns aux autres, leur cohésion, l'hygroscopie du dépôt, la percolation, la thixotropie, la réaction aux pressions, la viscosité, l'indice de plasticité et la coagulation.

On ajoutera encore la compaction, facteur qui se marque dans de nombreuses séries consolidées anciennes. Il convient de compléter ces diverses propriétés en y ajoutant les grands critères classiques d'un usage fréquent en géotechnique : la compression, l'élasticité, le gonflement, la porosité, la réaction aux électrolytes. Chacun dérive d'une méthode de détermination et possède son expression mathématique propre.

Dans les *roches consolidées*, la plupart de ces facteurs sont éliminés. La cimentation des grains a modifié la structure de la roche dans des proportions très diverses. Elle s'est durcie et a perdu de sa perméabilité. A part les critères importants qui ont été énumérés et décrits dans les pages précédentes, il reste un certain nombre de critères descriptifs accessoires, de valeur locale ou temporaire, tels que : schistosité et clivage (ces deux caractères s'étendant toutefois à des roches clastiques et calcaires dans toutes les grandes zones tectonisées), boudinage, cassures et diaclases de diverses origines et altération par les agents atmosphériques. Du point de vue plus technique, il convient de mentionner la résistance à l'écrasement, les propriétés de taille, la dureté, la conductibilité thermique ou électrique, l'élasticité, le magnétisme et la couleur, pour ne citer que les principales.

Limites des mesures et des descriptions.

Il existe de très nombreux cas dans lesquels on arrive aux limites des mesures et au point où l'exactitude devient illusoire; les chiffres n'ont plus guère de valeur. Certaines propriétés échappent aux mesures ainsi qu'aux descriptions exactes et il faut recourir à des expressions particulières. C'est à ce propos que A. JAMOTTE (30) a proposé l'emploi systématique de la *lithologie graphique* pour exprimer les formes de structures cristallines dans les roches calcaires et les dolomies et les mosaïques de pâte calcitique dans les grès. L'application par l'auteur de

ces méthodes à des séries comparées du Katanga démontre l'utilité de cette représentation. Elle est uniquement qualitative et s'emploie surtout dans les cas-limites.

Le problème de la limite des mesures et des analyses se pose d'une manière bien plus aiguë encore sur le plan général des roches clastiques complexes (ALLING, 1). Il apparaît bien souvent que les mesures sont faites sans assez d'esprit critique et que de nombreuses courbes de granulométrie ou d'analyses chimiques sont entachées d'erreurs. Ces erreurs viennent des méthodes qui varient d'un observateur à l'autre, d'un instrument au suivant et d'un groupe de sédiments au prochain. Cette pseudo-exactitude menace toute méthode d'analyse quantitative de roches sédimentaires. Les raisons en sont :

1. L'éloignement des prélèvements d'échantillons, soit dans le sens horizontal, soit dans le sens vertical. Il oblige à des inter- et à des extrapolations trop grandes. Exemple : mesures granulométriques de graviers de plages. Analyse chimique de la dolomie dans une assise calcaréo-dolomitique, etc.

2. La complexité des éléments de la roche. L'analyste doit alors opérer un choix dans les constituants. Il en élimine une part et n'en retient que quelques autres. Ceux-ci deviennent déterminants par une décision nécessairement arbitraire. Il néglige le reste et introduit une erreur à la suite de cette simplification. Exemple : mesures granulométriques de grès polygéniques de type flysch ou molasse.

3. Les variations dans l'emploi d'instruments par différents observateurs. Elle a déjà été relevée ci-dessus. Il faut y ajouter l'application d'une méthode au delà de ses limites normales de sensibilité. Exemple : L'analyse chimique globale des roches clastiques complexes, le tamisage des ultra-fins, l'hydroclassement de sables et de colloïdes, etc.

4. Les variations d'instrumentation et de méthode par un même observateur et d'un observateur à l'autre. Exemple : la durée et l'intensité du tamisage d'un sable, la densité des mesures granulométriques au microscope.

5. Négligence des lois statistiques et des probabilités, tendance à mesurer ce qui n'est pas mesurable.

Malgré ces dangers, les méthodes numériques donneront des critères descriptifs utilisables, à condition toutefois que les observateurs soient conscients des sources d'erreurs courantes

et les tempèrent par un « bon sens » scientifique et une raison critique qui les maintiennent dans les limites du possible. D'autres remarques seront ajoutées à ce sujet au cours du chapitre suivant.

Notations.

L'expression graphique des résultats joue un grand rôle en permettant des comparaisons et des démonstrations utiles.

L'histogramme est un des diagrammes courants; la courbe cumulative en dérive. Cette dernière est à la base de plusieurs nouvelles définitions : les médianes, les quartiles, les déviations de quartiles, l'obliquité, l'homométrie et l'hétérométrie, complétées de discussions mathématiques-statistiques (KRUMBEIN, P. TRASK, A. RIVIERE, A. CAILLEUX).

A. CAILLEUX (10) propose une méthode linéaire permettant d'établir la composition granulométrique-pétrographique d'un dépôt macroscopique. Son application aux mesures microscopiques de roches consolidées est aisée et relativement rapide; on construit ensuite les histogrammes et les courbes cumulatives.

J'ai fait quelques applications de ces calculs à des calcaires gréseux et à des grès à foraminifères du flysch, qui se sont révélées très instructives.

Le diagramme binaire, à composants inscrits le long d'axes orthogonaux, est la plus simple des notations graphiques, exprimant les proportions diverses des éléments d'une roche, ces deux composants étant généralement les détritiques, d'une part, et les chimiques; de l'autre.

A part leur utilité directe, ces méthodes et leurs notations ont eu le mérite de stimuler l'étude de plus en plus détaillée des dépôts sédimentaires. Les observations ont gagné en précision, des comparaisons ont surgi entre les milieux actuels de formation (glaciaire, fluviale, marin, etc.) et les dépôts qui s'y rattachent. Les diagrammes ternaires (triangulaires) sont de bons auxiliaires, pour autant qu'on peut réduire à trois le nombre des critères descriptifs et que ceux-ci soient numériquement comparables. C'est le cas des analyses chimiques et granulométriques. On en trouvera de nombreux exemples. Citons ici celui d'E. GEIGER (24) dans la molasse de l'Est de la Suisse, qui prend comme sommets :

1. Calcaire soluble. Partie chimique.

2. Minéraux argileux. Diamètre des grains : 0 — 0,05 mm. Partie colloïdale.

3. Grains. Quartz dominant et minéraux lourds. Grains d'un diamètre de 0,05 mm et au-dessus.

TH. ZINGG (54) emploie les sommets *Kies-Sand-Schluff*. Il ajoute un second diagramme avec *Grobsand-Feinkies-Feinsand-Schluff*. L'ensemble permet de comparer par des critères numériques les mélanges non cohérents de dépôts clastiques simples.

Le tétraèdre permet d'ajouter un élément de plus. Tout comme dans l'emploi du triangle, il est possible d'insérer entre les sommets de nombreux intermédiaires. Ces cas ont été discutés à propos des critères quantitatifs.

CRITÈRES QUANTITATIFS DANS LES SÉRIES SÉDIMENTAIRES.

Jusqu'ici, nous avons considéré l'application des critères descriptifs quantitatifs sous un angle particulier. Il s'agissait de ne prendre qu'un échantillon pour lui seul. Tout au plus le comparait-on peut-être à quelque autre spécimen prélevé dans son voisinage.

Il faut maintenant examiner l'étude systématique sériée en verticale, niveau par niveau, telle que quelques auteurs l'ont amorcée. C'est le domaine de la *lithologie comparée*, le terme *lithologie* étant pris au sens anglo-saxon comme synonyme de *pétrographie des roches sédimentaires*. Il comprend l'étude des minéraux, des organismes, des structures et des textures à diverses échelles.

Les observations quantitatives prennent dans ce domaine une valeur différente. Elles étaient absolues pour une roche isolée, elles deviennent désormais relatives. C'est la comparaison d'un critère à travers une série et d'un niveau à l'autre qui importera. Sa variation compte plus que sa valeur absolue. S'il s'agit, par exemple, d'une série gréseuse dont la granulométrie varie, il est superflu de donner des histogrammes pour chaque niveau. Il est bien plus significatif de poursuivre les variations du plus grand grain de quartz, les variations des relations clastiques ou les variations d'un certain minéral comme la glauconie, le fer ou le feldspath. Une des conséquences de cette transposition de l'absolu dans le relatif est une certaine simplification des méthodes. Il arrive souvent qu'en lithologie comparée, les

critères ainsi choisis soient plus aisés à mesurer et que l'on obtienne plus rapidement des résultats qu'avec les mesures complexes de la lithologie absolue. L'exemple du diamètre maximum du quartz et de sa courbe niveau par niveau l'illustre bien.

Citons ici le travail de H. J. FICHTER (21), qui applique au Crétacé helvétique (Nappe du Wildhorn) des mesures de diamètre maximum du quartz et de la glauconie en les exprimant graphiquement en fonction des épaisseurs de couches.

ED. PAREJAS et A. LILLIE (41) ont analysé le Crétacé supérieur de la Nappe de Morcles en Haute-Savoie. Ils ont retenu les critères numériques suivants : diamètre du quartz, du mica et de la glauconie détritique. L'utilisation des quantités d'organismes microscopiques a également donné d'utiles renseignements : prismes d'Inocérames, Lagenas et Gumbelina.

A. CAROZZI (11), dans le Purbeckien du Jura occidental, a mesuré le diamètre maximum du plus grand quartz clastique de chaque niveau; il a estimé la proportion en fer et mesuré par analyse quantitative chimique la teneur en $MgCO_3$ pour dégager le critère $\frac{\text{somme des carbonates}}{\text{calcite}}$.

Il y aurait encore d'autres critères à utiliser. Mais, jusqu'ici, ce domaine a été à peine exploré. Il règne de l'imprécision quant au choix des critères et à leur utilisation. Faute d'hypothèses de travail, on manque encore de méthodes, et pourtant les plus grandes perspectives s'ouvrent sur son avenir et les conclusions qu'on pourrait en dégager.

Trois échelles d'observations.

La tendance moderne des études lithologiques vers des données quantitatives entraîne les chercheurs à préciser leurs observations dans le détail. Mais l'emploi généralisé du microscope, du tamis et de la balance engage les recherches dans un domaine qui les abstrait. On oublie trop souvent de retourner au phénomène général dans son cadre naturel.

Il paraît donc utile de rappeler ici que pour arriver aux constructions paléolithologiques qui couronnent l'étude géologique d'une région (ou d'une époque), il faut étudier les séries à trois échelles de grandeur : l'échelle *microscopique* (au sens large du terme), l'échelle *macroscopique* et l'échelle *mégascopique*. La première comprend les méthodes de l'analyse qualitative et

quantitative de détail avec l'aide des instruments. La seconde s'étend à l'examen à l'œil nu de l'échantillon et du terrain, de son environnement et de l'affleurement. Elle comprend les mesures d'épaisseurs de bancs, l'analyse des facies, leurs textures, leurs variations et leurs relations. C'est également l'échelle du grand fossile et du gisement en général amenant à établir la stratigraphie de l'étage. A l'échelle supérieure, enfin, qu'on pourrait qualifier de mégascopique, faute de mieux, le point de vue est encore plus général et englobe les ensembles. C'est l'échelle du bassin, de la plate-forme, de l'orogène et de l'aire sédimentaire. C'est aussi celle des corrélations stratigraphiques. Il y entre une large part d'hypothèse et de simplifications nécessaires pour parvenir aux synthèses.

Conclusions.

En géologie, plus peut-être que dans d'autres sciences, le détail n'a de valeur que si on le replace dans l'ensemble. La recherche des critères numériques est tentante, car elle permet, enfin, semble-t-il, de serrer de plus près les données d'une science souvent trop floue. Mais elle oblige à s'engager dans le détail, ce qui souvent mène à des impasses. Ces critères sont cependant indispensables; on les voit prendre de plus en plus d'importance. La géologie suit une évolution qui la mène vers une science quantitative. L'analyse quantitative offre le double avantage d'apporter des résultats plus exacts et de stimuler de nouvelles observations. Prenons quelques exemples, qui compléteront ceux que nous avons donnés à propos de mesures absolues.

ED. PAREJAS (*op. cit.*) introduit l'*indice de clasticité*, qui exprime la puissance relative de l'agent de transport et la distance de la source des constituants clastiques.

A. CAROZZI, s'attachant aux milieux calcaires (11), se base sur la variation du diamètre maximum du quartz clastique mêlé aux calcaires. Il a distingué, en outre, la fréquence de ce même quartz. Dimensions et fréquences sont des critères descriptifs sûrs. L'auteur les met en relation avec les actions tectoniques qui règlent la sédimentation et dégage dans des séries la présence d'oscillations (critère descriptif-génétique). Ces oscillations seraient tectoniques (critère génétique). On peut en

déduire un *indice de sensibilité tectonique* et un *indice d'intensité tectonique* que nous ne voulons pas discuter ici, mais qui confirment l'apparition de nouvelles voies ouvertes par l'analyse quantitative.

La biostratigraphie (biostratonomie) est à son tour un domaine qui, bien qu'encore limité, est appelé à enrichir considérablement le nombre des critères descriptifs applicables aux séries sédimentaires.

Ce chapitre, réservé aux critères quantitatifs des roches sédimentaires, ne saurait être terminé sans un sérieux examen de leurs limites. En premier lieu, leur exactitude dépend de nombreux facteurs inhérents : 1° à l'observateur; 2° à la méthode; 3° aux instruments et 4° au type de roches. Tout changement apporté à l'un des trois premiers éléments au cours de recherches est une source d'erreurs.

Quant au type de roche étudié, il nécessite une connaissance préalable de certaines difficultés inhérentes à l'analyse de sa structure. Citons à titre d'exemple les mesures micrographiques dans les roches consolidées. A leur propos, M. LUGEON et M. VUAGNAT (53) ont récemment insisté sur les erreurs qui s'introduisent dans l'emploi du microscope et de ses mesures lorsque les sédiments deviennent toujours plus fins et dans les cas de *graded bedding*. Les causes de ces erreurs sont dues à ce que :

a) la granulométrie diminue, ce qui entraîne une variation de composition des ensembles minéraux;

b) des calcifications et des silicifications secondaires oblitèrent les structures primaires et faussent le rapport clastique-ciment ainsi que la composition de ce dernier;

c) le degré de précision varie avec la taille des grains;

d) dans les sédiments hétérométriques et mal classés, le passage des clastiques au ciment est confus. Celui-ci consiste souvent en grains devenant toujours plus fins. La pâte fondamentale est une mouture des éléments clastiques. En voulant poursuivre trop loin les mesures granulométriques, les résultats sont de plus en plus approximatifs.

CHAPITRE IV. — CRITÈRES DESCRIPTIFS.
LES ROCHES CONSIDÉRÉES ISOLÉMENT ET LES ROCHES
EN SÉRIES NATURELLES.

Dans ce qui précède, on a pu voir la lente évolution qui s'est produite dans l'étude des roches sédimentaires. Décrites tout d'abord roche par roche, elles l'ont été ensuite comme des éléments d'un ensemble ou des groupements partiels. Finalement, des tentatives ont été faites pour les rassembler d'après leur milieu génétique, leurs associations et leurs superpositions telles qu'on les observe en horizontale et en verticale dans le terrain. Pour poursuivre avec méthode cette analyse des associations de roches, il faut choisir des critères généraux de caractère descriptif.

Les critères généraux et permanents.

Les critères descriptifs et descriptifs-génétiques utilisés dans les classifications sont de deux ordres. Le premier est général, permanent et étendu. Le second est particulier, temporaire et local.

Les critères généraux doivent s'appliquer à des roches et à des séries de tous les âges, de tous les milieux et de tous les facies. Ils auront une extension assez vaste pour comprendre les critères accessoires et rappeler l'origine du sédiment.

Dans le cadre ainsi tracé, toute roche sédimentaire peut être définie par trois critères :

- les éléments clastiques;
- le ciment;
- les organismes.

Ce sont trois critères de structure, relatifs à la composition et à l'agencement des éléments de la roche à l'échelle microscopique surtout. Les *éléments clastiques* sont tour à tour dominants et récessifs. Dominants, ils forment les roches détritiques. Récessifs, ils tendent à se confondre avec le ciment. Ils se prêtent à un classement granulométrique. Les éléments grossiers sont les conglomérats et les éléments ultra-fins tendent à des argiles qui, elles aussi, peuvent être prises pour le ciment de la roche. Entre les deux, il y a place pour de nombreux termes de passage.

Le *ciment*, aussi nommé pâte fondamentale, représente la partie la plus fine de la roche. Il lie les deux autres groupes d'éléments : clastiques et organismes. Tantôt il leur est chimiquement apparenté, tantôt il est indépendant.

Génétiquement, le ciment provient ou de la mouture très fine des clastiques d'un dépôt ou d'un précipité de sels dissous. Dans le cas des argiles, la limite est difficile à établir; il y a convergence de facies. Lorsque le ciment est contemporain de la formation du dépôt, il est dit primaire. Lorsqu'il s'est introduit après le dépôt de clastiques ou d'organismes, il est considéré comme secondaire ou diagénétique. Il arrive souvent que des cristaux ou des masses diffuses s'individualisent tardivement dans la pâte fondamentale. Ici encore, il s'agit de diagénèse, facteur qui modifie la roche suivant des processus particuliers. Ils seront souvent séparés des critères généraux et traités niveau par niveau dans les séries comme critères particuliers.

Les *organismes* ont souvent été éliminés comme constituants des roches sédimentaires et cela provient en grande partie de la difficulté qu'on éprouve à les intégrer dans un système rationnel de classification. On ne saurait les décrire suivant des lois numériques et ils sont alors dissociés de l'analyse lithologique, point de vue aussi incomplet que celui qui consiste à ne les étudier que pour leur valeur chronologique.

Ce sont non seulement des indicateurs de dates, mais encore des témoins de conditions écologiques et climatiques, des facteurs de la sédimentation et du facies. Plusieurs de ces données sont particulières et locales, mais interviennent dans des séries à un moment précis, avec un sens précis. Prenons le cas des lumachelles et de fossiles roulés qui ont le comportement de clastiques de la roche. On les trouve dans presque tous les termes des roches sédimentaires.

Critères accessoires, particuliers, temporaires ou locaux.

Les grands groupes de roches que l'on établira sur la base des critères généraux seraient insuffisants à définir l'innombrable variété des roches sédimentaires avec une exactitude assez grande. Il existe, dans le cadre des trois groupes, un certain nombre de critères descriptifs, locaux et temporaires non négligeables. Dans l'analyse d'une série, ils interviennent pen-

dans un certain temps ou pour quelques bancs, ou sur une aire limitée. Ils complètent les critères généraux. En voici les plus importants :

Composition chimique et pétrographique des composants clastiques. Composition granulométrique.

Composition chimique et pétrographique des ciments et des termes diagénétiques.

Composition chimique et pétrographique d'un des composants tels que le fer, la potasse, les minéraux lourds, etc.

Structures (au sens microscopique du terme).

Textures (au sens macro- et mégascopique du terme).

Épaisseurs, joints, discordances, lacunes, surfaces de stratification.

Données biostratigraphiques, fossilisation, déformations. Il reste entendu une fois pour toutes que les terrains à fossiles sont datés, la chronologie étant un critère permanent.

Relations entre les éléments constitutifs généraux (tableau I).

Les relations clastiques-ciment-organismes sont complexes. L'analyse en est délicate du fait que les proportions et les composants changent soit dans le temps (en verticale), soit dans l'espace (en horizontale) et restent rarement constants.

TABLEAU I. — Les grands types de roches sédimentaires classés suivant des critères descriptifs de structure et les éléments constitutifs généraux.

Graviers, brèches et conglomérats	} Minéraux détritiques ou primaires.	} Clastiques.	
Sables, grès, arkoses, quartzites, tufs volcaniques, psammites			
Argiles, schistes argileux, phyllades, charbons	} Colloïdes ou suspensoïdes.		
Silex, chailles, minerais de fer sédimentaire, glauconie. }	} Minéraux diagénétiques ou secondaires.		} Ciment.
Calcaires à organismes divers, calcaires construits, calcaires dolomitiques			
Sels divers			

Voici quelques combinaisons courantes :

1. Les trois groupes sont représentés en proportions variables :
Clastiques dominants. Exemple : Flysch gréseux, grès molassiques.

Ciment dominant : calcaire gréseux, schiste gréseux.

Organismes dominants : lumachelle gréseuse, boues à Foraminifères.

2. Deux groupes sont représentés sur trois :

a) Clastiques-ciment. Grès calcaire. Flysch à helminthoïdes.

b) Ciment-organismes. Calcaires à encrines, à Foraminifères.

c) Organismes-clastiques : sables actuels à coquilles diverses.

3. Un groupe sur trois :

a) Clastiques seuls. Sables, grès sableux, bauxite.

b) Organismes seuls. Récifs coralliens, bone-bed.

c) Ciment seul. Argile, marne, calcaires divers stériles.

Série standard.

On a vu plus haut que la présence des organismes dans les roches rend leur classification raisonnée très délicate, faute de paramètres communs. On peut tenter une construction triangulaire pour exprimer le pourcentage de ciment-clastiques-organismes d'un grand nombre de roches. La méthode serait basée sur les mesures de Rosiwal-Delesse au microscope.

Pour classer les roches sédimentaires d'après les grands critères, il faut tout d'abord se baser sur le ciment et les clastiques, puis en dernier lieu introduire les organismes.

Dans le tableau I, on a placé les types les plus courants de roches dans les grands groupes descriptifs.

Ce groupement peut être poussé plus loin en tenant compte que, dans la nature, il existe de fréquentes associations de roches. Il suffit de citer les conglomérats et les grès, eux-mêmes associés aux schistes gréseux par passage progressif, les calcaires et les calcaires dolomitiques, le groupe des évaporites. Si l'on se base sur un grand nombre de cas, sur les séries récurrentes, sur les passages latéraux répétés, il est possible d'admettre une série d'enchaînements et des passages successifs de types de roches les uns aux autres. Cet enchaînement commence par les

TABLEAU II. — Schéma montrant quelques types d'associations fréquentes de roches sédimentaires et leur groupement suivant les critères descriptifs de structure.

<i>Associations de roches.</i>	<i>Exemples d'associations anciennes.</i>	<i>Groupes lithologiques.</i>
Conglomerats. Grès grossiers.	{ Fluvio-glaciaire pléistocène alpin. Flysch préalpin pro parte (Simmen-Niesen). }	Clastiques grossiers.
Grès grossiers. Grès fins.	{ Flysch divers et molasse pro parte. Alpes. Séries gréseuses, Millstone grit. Fa-mennien. }	Clastiques moyens.
Grès fins. Grès schisteux.	{ Flysch comme ci-dessus. Complexes analogues des Appalaches, Ouachita, séries houillères. }	Clastiques fins.
Grès schisteux. Schistes gréseux.	{ Mêmes complexes. Lias interne helvétique. Silurien appalachien. Créacé canadien. }	Clastiques fins + colloïdes.
Schistes gréseux. Argiles schisteuses.	{ Bajocien-Barthonien ultra-helvétiques. Éocène helvétique. Série inférieure, flysch du Niesen. }	Colloïdes + clastiques fins.
Argiles. Marnes.	{ Callovo-oxfordien vocontien. Molasse subalpine pro parte. }	Colloïdes + précipités chimiques et biochimiques.
Marnes. Calcaires divers.	{ Créacé inférieur du Jura. Complexe d'alternances helvétique et provençal. }	Ciment.
Calcaires divers. Calcaires dolomitiques.	{ Frasien belge. Viséen. Urgonien des Basses-Alpes. Provence. Malm helvétique et dauphinois. }	Précipités chimiques et biochimiques calcaires.
Calcaires divers. Gypses.	{ Molasses oligocènes. Trias germanique. Permio-Trias nord-atlantique. }	Précipités calcaires et primitifs sels.
Sels et évaporites.	Sannoisien rhénan.	Sels divers.

conglomérats les plus grossiers, passe par les clastiques de plus en plus fins, par les colloïdes, les précipités calcaires et finit aux évaporites. On a ainsi la série théorique

Clastiques-Colloïdes-Diagénétiques-Précipités calcaires-Précipités salins.

C'est ce que je nomme *Série standard*. Il peut y en avoir d'autres et elle en comprend d'autres également, d'importance mineure. Il faudrait, pour en démontrer la réalité, passer en revue un très grand nombre de cas. Nous ne pouvons pas le faire ici, mais il suffit de considérer l'ordre adopté comme une hypothèse de travail, avec toutes les réserves sur sa vérification.

Le tableau II montre la mise en place des associations fréquentes de roches dans leur ordre naturel et l'établissement de la série standard.

Le passage des clastiques au ciment n'est pas simple, pour la raison suivante : le ciment peut se présenter sous la forme de calcaire, d'argile ou d'un produit de diagénèse. Ainsi, dans la transition des grès aux roches à ciment prédominant, dès que les clastiques sont assez diffus, il y aura trois possibilités d'évolution. Dans le tableau III, on trouvera le résumé de ces trois types.

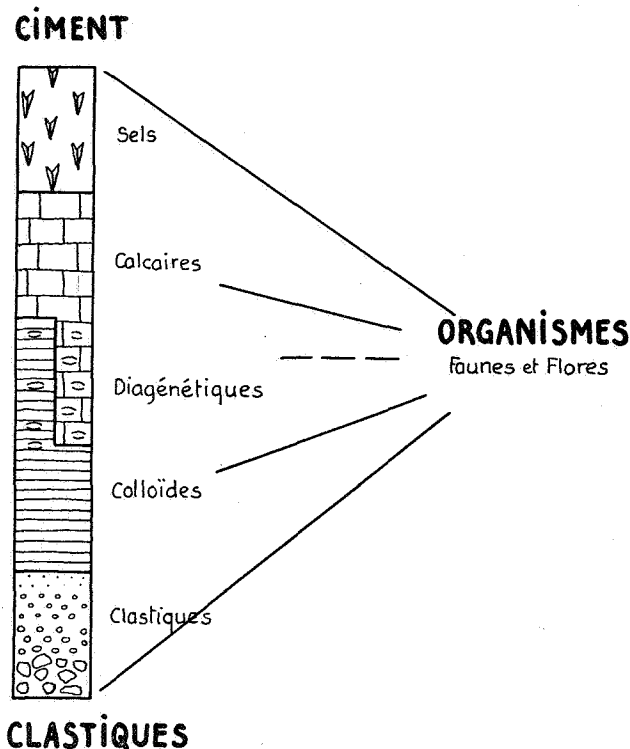
TABLEAU III. — Types de roches intermédiaires entre les roches gréseuses à ciment récessif et les roches calcaires et argileuses à clastiques récessifs ou absents.

<i>Clastiques dominants.</i>		<i>Ciment dominant.</i>
Clastiques prédominants dans un ciment diagénétique ou sans ciment.	Clastiques à ciment colloïdal. Clastiques à ciment calcaire.	— Colloïdes à clastiques. — Colloïdes. — Calcaires à éléments clastiques. — Calcaires purs.

Ces passages sont fréquents dans les flysch et chaque cas demande à être considéré en détail, au microscope, pour chaque série. Pour l'instant, on retiendra la notion de la série standard, qui, jusqu'ici, rejoint celle établie par P. D. KRYNINE, mais à laquelle il manque les organismes.

En les intégrant aux autres critères descriptifs, on aura les éléments complets d'une classification descriptive-structurale des roches sédimentaires. Le tableau IV en donne le schéma.

TABLEAU IV. — Schéma montrant les relations entre les trois grands constituants des roches sédimentaires. Les clastiques sont disposés par granulométrie décroissante (graded bedding) et les roches de diagénèse figurent aussi bien dans les calcaires que dans les argiles. La double disposition de ces deux groupes de roches correspond aux dispositions du tableau III, du double passage des clastiques purs au ciment pur.



Pour la facilité des futures analyses de séries, il est préférable de modifier cette notation triangulaire et de porter les organismes à droite de la série standard. Les éléments de classification sont en tête de colonnes. Dans le tableau V, on a porté un certain nombre de roches sédimentaires fréquentes. Leur place dans la classification est marquée par un (ou deux) point placé sous le critère correspondant à sa composition.

On verra dans la suite des analyses que la série standard est rarement complète et que, dans le détail, elle subit de nombreuses modifications. Elle est adaptée aux critères secondaires énumérés ci-dessus.

L'opération de base pour analyser une série sédimentaire consiste à dresser la coupe lithologique détaillée à gauche des colonnes et de reporter par un (ou plusieurs) point leur composition dans les colonnes respectives. On joint ensuite les points correspondants par des courbes. Ces courbes seront les *courbes*

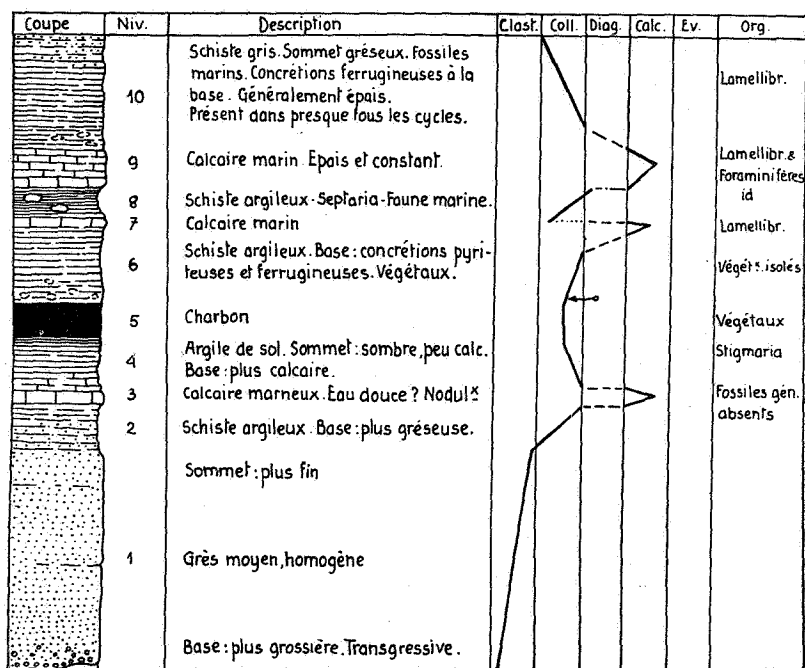


FIG. 1. — **Cyclothème du Pennsylvanien. Illinois et Pennsylvanie (U.S.A.).**

Série de roches formant un « cycle » à l'intérieur duquel la courbe lithologique indique 3 oscillations. Chaque oscillation montre une tendance du dépôt vers les calcaires en perdant clastiques et colloïdes. Elle est suivie d'un retour à des formations plus clastiques. On connaît des cyclothèmes à 1 ou 2 unités.

lithologiques des clastiques, du ciment, des minéraux lourds, de la glauconie, etc., dont l'allure est fonction des phases de la sédimentation de la série.

La figure 1 montre un exemple de mise en courbe d'une série simple.

Pour l'exemple en question, la courbe lithologique est générale, construite en n'utilisant que des critères macroscopiques et qualitatifs. Il en sort clairement l'évolution lithologique de la

sédimentation en ce point. Sur une surface érodée, la série commence avec des clastiques grossiers qui vont se décanter pour faire place à du matériel toujours plus fin jusqu'au moment où se forment des calcaires plus purs vers le haut, puis à nouveau de plus en plus chargés de colloïdes. Le charbon se dépose, puis des clastiques toujours plus fins, à la base desquels s'ajoutent des solutions minérales dans le ciment. Un bref épisode argileux marque un retour d'apports qui, à leur tour, se décanteront et permettront aux calcaires de se précipiter. Le cycle se termine sur un retour progressif des colloïdes et des clastiques fins.

On ne saurait exagérer la valeur de cette courbe lithologique, mais elle est utile pour des comparaisons, telle un *log* de carottage géophysique, et pour la discussion générale de l'évolution d'une région.

J'espère ultérieurement en montrer les applications aux complexes calcaires, gréseux et salins.

Conclusions.

Au prix d'un certain nombre de simplifications, il est possible d'arriver à un groupement descriptif-génétique des roches sédimentaires. Plusieurs auteurs y sont parvenus, mais à partir d'autres critères.

Les critères de structure, peu employés jusqu'ici, semblent bien convenir à une classification, car ils sont souples et ménagent des termes de passage d'une classe à l'autre. J'ai pu contrôler ces passages dans les séries du flysch, puis de l'Helvétique des Préalpes et de l'autochtone alpin, enfin dans l'Est et le Sud des États-Unis et dans le Nord de l'Europe. J'ai également vérifié le jeu des trois éléments aux trois échelles d'observations.

Ceci m'amène à considérer dans son ensemble la série des roches qui s'étend des conglomérats aux évaporites comme une série standard, très théorique pour l'instant, mais que tendent à suivre un grand nombre de séries naturelles du type des cycles rythmiques pennsylvaniens, ceux des plates-formes épicontinentales, de nombreux niveaux de flysch, de grauwackes, d'évaporites, etc., dans divers milieux. Cette notion de *série standard* m'a dirigé dans l'analyse du Mésozoïque de la Nappe du Niesen et j'en ai exposé les principes au symposium du Flysch en 1946, à Bâle, devant la Société Géologique suisse. Depuis lors, P. D. KRYNINE (35) a publié un travail où il arrive à des conclu-

TABLEAU V. — Position des principaux types de roches sédimentaires dans la série standard.

	Clastiques	Colloïdes	Diagénétiques	Calcaires	Évaporites	Organismes
<i>Principaux types de roches détritiques.</i>						
Alluvions fluviales ou marines ...	+					Org. fluv., terr. ou marins.
Poudingues mono- et polygéniques	+					Org. fluv., eau d ^{co} ou marins.
Brèches à ciment calcaire	+	- - -	- - -	+		Id.
Brèches à ciment de calcite	+	- - -	+			Id.
Conglomérat	+					Id.
Sable	+					Id.
Grès calcaire	+	- - -	- - -	+		Id.
Grès siliceux	+	- - -	+			Org. surtout marins.
Quartzite	+	- - -	+			Org. rares.
Molasse (grès)	+	- - -	+			Org. terr. eau d ^{co} et marins.
Macigno	+	+				Id.
Arkose	+					Org. terrestres.
Psammite	+					Org. divers + végétaux.
Grès à foraminifères, à mollusques	+					Org. marins.
<i>Principaux types de roches argileuses.</i>						
Argile smectique		+				
Argile de décalcification		+				
Argile latéritique	+	+	+			
Bauxite		+	+			
Schiste argileux		+				
Schiste ampéliteux		+				Débris charbonneux.
Schiste bitumineux						Débris sapropéliens.
<i>Principaux types de roches diagénétiques.</i>						
Silex			+			Spicules de Spongiaires.
Chailles			+			
Radiolarite			+			Radiolaires.
Jaspe			+			
Phtanite			+			
Oolithe ferrugineuse			+			+ org. marins (Céphalop.) rares.
<i>Principaux types de roches carbonatées.</i>						
Calcaire compact; Calcaire oolithique				+		Org. marins divers.
Calcaire à entroques, à <i>Lithothamnium</i> , à foraminifères				+		Id.
Calcaire dolomitique; Dolomie				+		Org. absents.
<i>Principaux types de roches salines.</i>						
Gypse; Anhydrite; Sel gemme; Sylvine					+	

sions analogues, dans une classification à 2 « end-members », les clastiques et le ciment, alors que je considère indispensable de tenir compte des organismes comme un des trois termes élémentaires. Il reste ainsi : un terme initial représenté par les clastiques les plus grossiers, de nombreux termes intermédiaires et un terme final représenté par le dernier dépôt des évaporites.

Enfin, un terme complémentaire groupe les organismes.

CHAPITRE V. — CRITÈRES GÉNÉTIQUES.

INTRODUCTION.

L'analyse des séries sédimentaires et son interprétation gagnent en précision lorsqu'elles sont contrôlées par l'observation des phénomènes actuels.

L. CAYEUX (13) a formulé un certain nombre de critiques fondamentales contre la comparaison entre des séries anciennes et les dépôts actuels. Ses objections portent sur des formations particulières : phosphatées, dolomitiques, oolithiques et ferrugineuses. On ne saurait généraliser, car ce serait tomber dans un extrême aussi erroné que de chercher des comparaisons trop étroites en érigeant l'actualisme en un dogme. On n'oubliera jamais que les comparaisons avec les phénomènes actuels sont soumises aux réserves suivantes : nos connaissances du domaine marin et de ses fonds sont encore incomplètes. Du point de vue de leur durée, elles ne portent que sur une brève phase d'un long continu. Enfin, la phase actuelle, même si on la prolonge dans le Quaternaire ancien, est un lendemain d'orogénie, ce qui implique un type de sédimentation très particulier tant par sa prédominance d'aires continentales que par l'isolement des provinces sédimentaires et la vaste extension de formations détritiques et colloïdales. Il exclut dans une large mesure d'autres types de sédimentation.

En revanche, le domaine de la sédimentation actuelle, malgré ses imprécisions et sa complexité, permet de choisir un certain nombre de critères sûrs qui auront la propriété d'être à la fois génétiques et descriptifs.

Il ne peut être question de les examiner en détail. L'objet de nos travaux est d'en rechercher quelques-uns qui soient applicables, parce que généraux, permanents, valables pour une

large série de sédiments, indépendants de la diagénèse et impliquant sans doute possible des relations entre le sédiment observé et son origine (milieu et agents).

Rappelons qu'on dispose des trois éléments constitutifs d'une roche : les *clastiques*, le *ciment* et les *organismes*. Ce sont ces derniers qui seront les index les plus utiles du milieu, puis suivent les *clastiques* avec leur granulométrie, leur pétrographie, leur morphologie et leur structure. Le ciment complète les données apportées par les deux premiers constituants.

L'EAU, AGENT CONTRÔLANT LA SÉDIMENTATION.

Éliminons pour le moment les formations particulières des climats arides et tropicaux qui sont typiquement continentales, pour ne considérer que les sédiments les plus abondants et les plus répandus dans les séries anciennes, les sédiments marins et ceux d'eau douce. L'agent le plus important dans leur élaboration est l'eau. Elle passe par les étapes suivantes : précipitations atmosphériques, ruissellement, écoulement et rassemblement dans les océans. Elle retourne enfin à l'atmosphère après un trajet plus ou moins long. Ce cycle règle la répartition en aires de la plus grande quantité des sédiments qui se retrouveront dans les séries géologiques.

LES ÉTAPES DE LA SÉDIMENTATION EN MILIEU AQUEUX.

L'eau, en accomplissant son cycle, va jalonner son trajet d'aires d'érosion et d'aires de sédimentation. De l'une à l'autre, elle transporte et elle dépose. Il est impossible de retrouver dans les séries anciennes toutes les aires de la sédimentation actuelle. On peut cependant en rétablir un certain nombre dont l'origine est certaine. Cette origine est démontrée par les critères descriptifs-génétiques des sédiments, critères nécessairement généraux mais qui sont complétés par les données des flores et des faunes fossiles.

Pour faciliter la représentation de ces aires et dans un but plus didactique que démonstratif, j'ai admis une succession et un groupement d'aires sédimentaires en fonction du cycle de l'eau et de la tectonique, second agent contrôlant toute la sédimentation dans les séries anciennes.

Si l'on prend l'eau dans le trajet le plus long qu'elle puisse effectuer sur un continent, du plus haut en altitude ou en lati-

tude au plus profond des océans, on parvient à concevoir une succession très générale des aires sédimentaires. Elle s'observe clairement à notre époque sur les continents et le long des côtes. Elle nous échappe encore dans les océans.

Dans les séries anciennes, le facteur temps intervient, montrant les aires sur de longues périodes au cours desquelles les phénomènes locaux et temporaires se sont répartis et égalisés, ce qui facilite des généralisations. Dans l'interprétation d'un tel schéma, il faut se souvenir que le trajet de l'eau peut être commencé ailleurs qu'au début, c'est-à-dire en cours de cycle, qu'il peut être interrompu ou achevé prématurément, rappelant en cela le mécanisme d'un cycle d'érosion. Son entité n'apparaît que sur de grandes séries et à la suite de nombreuses synthèses paléolithologiques. Il se dégage d'un grand nombre d'observations, au delà des exceptions et des cas particuliers.

LES AIRES DE LA SÉDIMENTATION ANCIENNE (pl. I).

Les descriptions qui suivent sont résumées pour les domaines continental, fluvial et lacustre, qui n'offrent rien d'original. On se référera à W. H. TWENHOFEL (*op. cit.*, chap. VII) et à E. J. PETTJOHN (*op. cit.*) pour les définitions et descriptions. La planche II permet, à titre d'exemple, de situer les grandes aires sur le continent nord-américain et sur sa périphérie. Dans le domaine continental, on peut reconstituer quatre grands milieux de dépôt, avec leurs aires de sédimentation. Ce sont :

1. Les aires arides et tropicales.

Elles sont soumises à deux types de climats bien différents, mais qui sont groupés ici, par souci de simplification, avec des critères descriptifs.

Conglomérats à structure de « fanglomérates », grès massifs, grains éolisés, stratification oblique, lenticulaire. Evaporites. Dépôts résiduels, fer. Loess. Organismes : terrestres dont Ver-
tébrés.

Exemples anciens :

Grès de Torridon, Écosse.

Old red Sandstone dévonien. Grande-Bretagne.

Permo-Trias, Colorado, U.S.A.

Sidérolithique éocène, Jura.

Bauxites et formations connexes Crét. sup. Europe occidentale.

Entre l'aire 1 et le milieu 5 (rivières), l'eau, si elle parvient à passer, ne transporte que des matières dissoutes et des colloïdes, notamment du fer et des sels de délavage continental (Potasses d'Alsace provenant de la lévigation du Permo-Trias germanique).

2. Aires montagneuses et arctiques.

Régions élevées et régions de hautes latitudes ayant en commun un climat humide et froid, mais sans glaciers actifs ni régime nival persistant. Critères : formations de clastiques grossiers de piedmont, cônes alluviaux, éboulis, sols à formations tourbeuses. Cimentation imparfaite, matériel mal classé. Intercalations de lignites. Organismes terrestres.

Exemples anciens :

Tertiaire de Californie et de Nevada, U.S.A.

Old red Sandstone, Grande-Bretagne pro parte.

Mortar beds, Tertiaire, Kansas, Nebraska, U.S.A.

Formations quaternaires d'Europe moyenne et Amérique du Nord, hors du périmètre glaciaire.

3. Aires glaciaires et périglaciaires.

Régions soumises aux climats glaciaire et interglaciaire, alternativement humides et secs, doux et froids. Éolisations, nivations. Dépôts en vastes nappes, mal stratifiées, à changements de facies fréquents et locaux. Argiles à blocaux, conglomérats, varves, sables, argiles, loess, limons, sols délavés divers, prêles, ergeron. Roches moutonnées.

Cimentation augmentant avec l'âge des formations : faible au Quaternaire, forte dans les complexes à tillites permien et précambriens.

Organismes : terrestres, eau douce. Généralement rares. Végétaux.

Exemples anciens :

Conglomérats de Cobalt. Canada.

Tillites précambriennes de Squantum, Mass. U.S.A.

Tillites permiennes de Gondwana.

Quaternaire du système glaciaire arctique.

Systèmes morainiques alpins.

4. Aires torrentielles et fluvioglaciales.

Elles sont limitées à des formations graveleuses et sableuses de fonds de vallées de type montagneux alpin. Le matériel est grossier, subanguleux à arrondi, mal classé. Ce sont des nappes de graviers et de sables à stratification oblique, en couches lenticulaires. Rares lignites. Organismes : rares, terrestres, eau douce. Végétaux.

Exemples anciens :

Deckenschotter suisses alémaniques.

Fluvioglaciale rhodanien et rhénan.

Entre les aires 4 et 5, l'eau transporte activement les matières solides et les suspensoïdes, alors que le drainage entre 2 et 5 et 3 et 5 est moins puissant, faute de pente et d'alimentation à la source. Le passage de 3 à 4 est fréquent dans les Alpes.

5 à 9. Rivières, deltas lacustres, lacs, étangs, fleuves, deltas marins et estuaires.

Ces divers milieux n'appellent pas de description particulière. Le transport par l'eau d'une aire à l'autre est fonction des précipitations, de la pente et du relief. Les termes de cet enchaînement d'aires sédimentaires peuvent se répéter, comme le long du cours actuel du Congo et en Amérique du Nord. Ils peuvent également être supprimés, comme dans le cas du Pô, où l'on passe de 4 à 5 puis à 9. La planche III montre pour le lac Léman la disposition des deltas et des aires sédimentaires en milieu lacustre.

LE MILIEU MARIN.

Il est difficile de trouver un groupement satisfaisant des provinces de la sédimentation marine ancienne. Les grandes aires proposées par la plupart des auteurs sont trop strictement paléogéographiques (E. KAISER, E. HAUG, K. ANDRÉE). Il a fallu revenir à des définitions plus voisines des formations actuelles, ce qu'a fait J. TERCIER. Cet auteur a remplacé les formations néritiques, bathyales et abyssales d'E. HAUG par des critères basés sur la sédimentation actuelle et la tectonique, à savoir : la sédimentation paralique, épicontinentale et marginale pour l'ancienne zone néritique et les régions géosynclinales, et océanogènes pour les anciennes aires bathyales et abyssales.

Les définitions de J. TERCIER conviennent bien pour les dépôts paraliques, molassiques et pour les flysch alpins. J'ai eu de la peine à appliquer ces critères à des séries plus anciennes, dans les fosses des Alleghanys, dans le système appalachien et dans des séries épirogéniques mobiles du type dévonien belge.

Il semble, d'une manière générale, que plus on remonte dans le passé géologique, plus il est difficile d'appliquer des critères actuels.

La *sédimentation paralique* ne se produit pas seulement en bordure des mers épicontinentales, mais autour de bassins subsidents, autour de bassins orogéniques atténués et même le long de côtes océaniques. Le caractère paralique est donné par une sédimentation active, une certaine subsidence et un équilibre particulier entre l'enfoncement et les apports. J'ai tenu compte de ces directives dans l'élaboration du schéma en admettant que les apports terrigènes sont plus ou moins actifs. Lorsqu'ils sont actifs le long d'un littoral, ils déterminent le dépôt paralique, sauf en milieu orogénique actif où il se forme du flysch.

La sédimentation en milieu réducteur est un cas particulier de la sédimentation marine et se produit sur diverses aires sédimentaires.

10. Aires épicontinentales.

Partie bordière : gamme étendue de sédiments clastiques fins aux évaporites. Glauconie. Couches charbonneuses. Prédominance des colloïdes. Partie axiale : Prédominance des calcaires. Forte participation des organismes. Stratification régulière, récurrences cycliques, alternances, grande extension des facies. Organismes : plancton et necton. Benthos en bordure.

Exemples anciens : bordiers : Lias et Dogger des Préalpes médianes et de l'Helvétique. Axiaux : Mésozoïque helvétique, dauphinois et jurassien. Silurien des Alleghanys. La figure 2 montre un exemple d'aire épicontinentale bordière avec alimentation terrigène.

11. Aires subsidentes.

Elles s'étendent sur le fond de bassins subsidents. Dans la partie bordière, on a le facies paralique varié avec psammites, grès souvent grossiers, schistes et marnes. Organismes : marins, saumâtres. Végétaux et couches à charbon. Stratification mar-

quée, facies d'alternances, variations d'épaisseurs et de granulométrie. Dans la partie axiale, la régularité du grain et des couches augmente. Les faunes se font plus rares. Elles seules marquent les différences entre eau douce et eau marine, alors que les facies restent indifférents à ces changements. Hauts-fonds à formes terrestres.

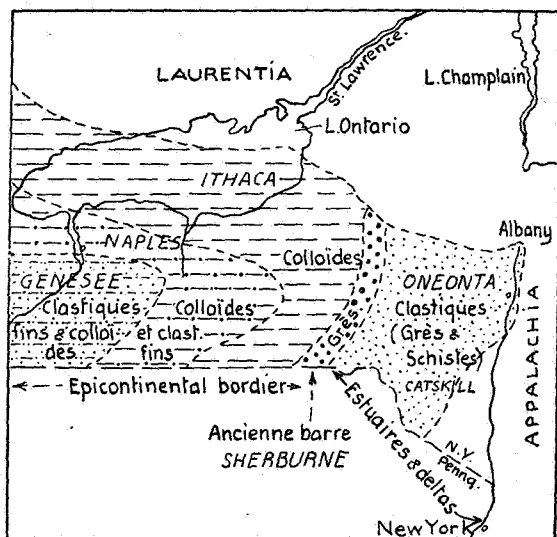


FIG. 2. — Aire sédimentaire du type épicontinental bordier.

Dévonien supérieur (Portage) de l'État de New-York. Genesee, Naples, Ithaca, etc. : provinces bionomiques.

D'après SCHUCHERT, 1943.

Exemples anciens : 1° Molasse alpine, en bassin allongé; 2° Facies à Graptolithes en mer étalée; 3° Facies « Arbuckle » fin; 4° Facies « Champlain » grossier. Ce dernier ressemble souvent aux sédiments de l'aire suivante.

12. Aires orogéniques.

Ce terme comprend les régions mobiles de sédimentation active. Il évite l'emploi du terme *géosynclinal*, qui ne convient pas dans de nombreux cas, comme, par exemple, les belts très mobiles de la côte californienne et les aires du Tertiaire nord-africain.

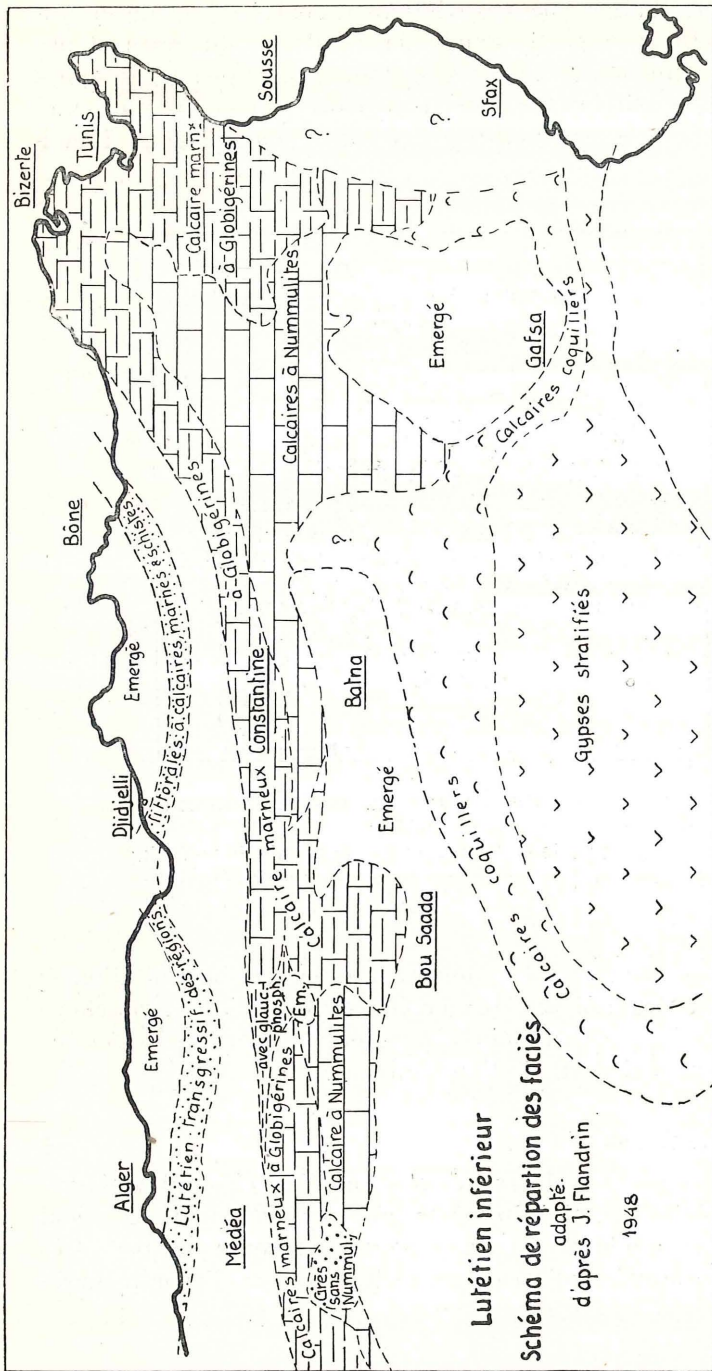


FIG. 3. — Aire sédimentaire du type orogénique bordier calme. Lutétien inférieur d'Afrique du Nord. Une décantation horizontale se marque avec les dépôts les plus clastiques au Nord et les plus salins au Sud.

D'après J. FLANDRIN,
 Contribution à l'étude stratigraphique du Nummulitique algérien, Alger, 1948.

Dans la partie bordière, élastiques grossiers dominants en phase active et récessifs en phase calme. Accompagnés de élastiques et de colloïdes. Le ciment est souvent individualisé, avec ses faunes planctonique et nectique. Granulométrie hétérogène, stratification oblique, souvent confuse, lenticulaire. Cette zone bordière peut être très étroite, comme, par exemple, dans le Flysch du Niesen au Maestrichtien, ou plus large, comme dans le flysch ultra-helvétique. La partie axiale tend à ressembler, par ses dépôts, à certaines parties d'aires subsidentes et il y a passage de l'une à l'autre, comme dans le cas de la molasse subalpine oligocène (Cucloz).

Exemples anciens : partie bordière : flysch grossier, wild-flysch, faciès de *Magog* du Champlain, U.S.A. Partie axiale et parties bordières en phases calmes : Séries d'Ocoee et de Talladega des Appalaches; faciès d'Ouachita du flysch, flysch créacé de la nappe de la Simme. La figure 3 donne un exemple d'aire orogénique peu active.

13. Aires océaniques alimentées.

Ce terme s'applique aux aires qui n'ont pas trouvé leur place dans les catégories précédentes, rarement rencontrées dans les séries anciennes et couvrant le fond des grands océans actuels. Suivant la définition adoptée jusqu'ici, le terme est descriptif et évite les notions génétiques de profondeur, de paléogéographie ou de climat, voire de grande tectonique. Il s'apparente avec les dépôts épicontinentaux par des apports terrigènes fins en bordure et des apports surtout colloïdaux et biochimiques dans la partie axiale. C'est le domaine des boues colorées à Foraminifères pour l'époque actuelle et des dépôts tabulaires des séries anciennes du Silurien supérieur et du Dévonien de l'Est de l'État de New-York et de la Pennsylvanie. Il est probable qu'on ne connaît rien de semblable en Europe après le Trias.

14. Aires océaniques résiduelles.

La sédimentation comprend une gamme limitée de termes. Ce sont des argiles, des organismes siliceux ou cornés. Actuellement, ces dépôts se forment dans les grands fonds ou hors des aires d'apports actifs terrigènes ou chimiques.

Dans les séries anciennes, on leur attribue certaines argilites, des calcaires à *Aptychus*, des jaspes et quelques radiolarites.

Dans notre esprit, ces aires peuvent se trouver à diverses profondeurs et dans diverses provinces tectoniques. Un exemple de grande étendue serait offert par les phyllades rouges ou noirs du Cambrien supérieur belge, avec leurs niveaux stériles, à manganèse et à otrérites.

15. Aires volcaniennes.

Ce terme désigne les régions recevant les apports solides des volcans, de leurs émissions et de leurs coulées. On y ajoutera également les coulées sous-marines et le produit de leur altération. Ce groupe de sédiments est fréquent dans l'océan Pacifique et en Insulinde. Dans les séries anciennes, on y rattachera les formations de Taveyanne pour les Alpes et les facies à pyroclastiques du Silurien belge.

16. Aires d'évaporites.

Le fait que ces sédiments se déposent actuellement dans des golfes, en eaux débarrassées de leurs suspensions, est confirmé dans la plupart des séries anciennes. Le cas des molasses à gypses semble faire exception, mais il s'y rattache cependant. On est donc justifié à placer cette étape du cycle de l'eau en fin de circuit, d'autant plus que l'eau a atteint un degré élevé de concentration. Il est évident que dans bien des cas, cette eau n'aura pas effectué toutes les étapes antérieures du cycle. Il sera notamment abrégé sous un climat chaud et sec.

LE CRITÈRE DE PROFONDEUR.

C'est un caractère génétique appliqué fréquemment aux sédiments des séries anciennes. Il est très rare qu'il soit employé à bon escient, c'est-à-dire avec la sûreté que donnerait un critère descriptif. On l'a donné presque invariablement à des dépôts colloïdaux ou siliceux, à des schistes et à des phyllades, sans fossiles. Cette façon de voir a faussé bien des reconstructions paléogéographiques. Un changement de facies est trop commodément expliqué par un changement de profondeur. Or il faut rappeler que d'autres facteurs génétiques ont également pu changer et avoir le même effet sur la sédimentation. Ce sont : les variations de sens et de vitesse des courants, l'alimentation de l'eau en cours de cycle, son chimisme avec sa répercussion sur les organismes, les modifications des rivages et, facteur sou-

TABLEAU VI. — Répartition schématique et générale des dépôts d'aires sédimentaires anciennes dans les grands groupes de la série standard. Quelques exemples montrent l'absence de dépôts dans groupe donné.

Aires paléolithologiques	Clastiques	Colloïdes	Diagénétiques	Calcaires	Evaporites	Organismes
Aires arides et tropicales ...	■	■	■			Terrestres rares.
Aires montagneuses et arctiques	■	■	■			Terrestres rares.
Aires glaciaires et périglaciaires	■	■	■			Terrestres rares.
Aires fluvio-glaciaires et torrentielles	■	■	■			Terrestres et eau douce.
Rivières	■	■	■			Terrestres rares.
Deltas lacustres	■	■	■			Limniques rares.
Lacs, étangs	■	■	■	■		Limniques. Flores et faunes.
Fleuves	■	■	■			Terrestres et fluv. rares.
Deltas, estuaires	■	■	■			Saumâtres. Flores et faunes.
Aires épicontinentales bordières	■	■	■			Marins-littoraux benthiques.
Aires épicontinentales axiales		■	■	■		Néritiques planct. et benth.
Aires subsidentes bordières	■	■	■	■		Saumâtres. Nérit. Benth.
Aires subsidentes axiales	■	■	■	■		Planct. Benth.
Aires orogéniques bordières.	■	■	■	■		Nérit. Benth. et planct.
Aires orogéniques axiales...	■	■	■	■		Planct. Benth.
Aires océaniques alimentées bordières	■	■	■	■		Planct. Benth.
Aires océaniques alimentées axiales	■	■	■	■		Planct. Benth.
Aires océaniques résiduelles.	■	■	■			Planct. Nect.
Aires océaniques vulcaniennes bordières	■	■	■	■		Plancton. Accident.
Aires océaniques vulcaniennes axiales	■	■	■	■		Plancton. Accident.
Evaporites				■	■	Accident.

vent négligé : le *temps* pendant lequel une masse d'eau a stationné dans un bassin. Nous y reviendrons à propos des séries sédimentaires.

En bref, le facteur profondeur n'est pas prépondérant dans le processus de la sédimentation. Il joue un rôle certain mais au même titre que, par exemple, le facteur tectonique ou le facteur organique. Pour s'en convaincre, on verra combien, sur les rares cartes du fond des mers actuelles, la sédimentation est indépendante de la profondeur. Dans le Léman (ROMIEUX (1930) était arrivé à des conclusions analogues. Le mécanisme de l'alimentation des bassins par le jeu de l'ouverture ou de la fermeture des détroits, le contrôle du chimisme de l'eau sur la vie marine sont tout aussi déterminants. (Cfr. VAN RIEL dans SVERDRUP, JOHNSON et FLEMING, *op. cit.*, p. 737.) Le critère de profondeur ne semble actuellement pouvoir s'établir que sur les organismes. Lorsqu'ils sont abondants et typiques, comme les coraux, les faunes benthiques littorales ou les végétaux de marais, il est alors possible de se prononcer. C'est généralement le cas dans des séries calcaires et les complexes à charbon.

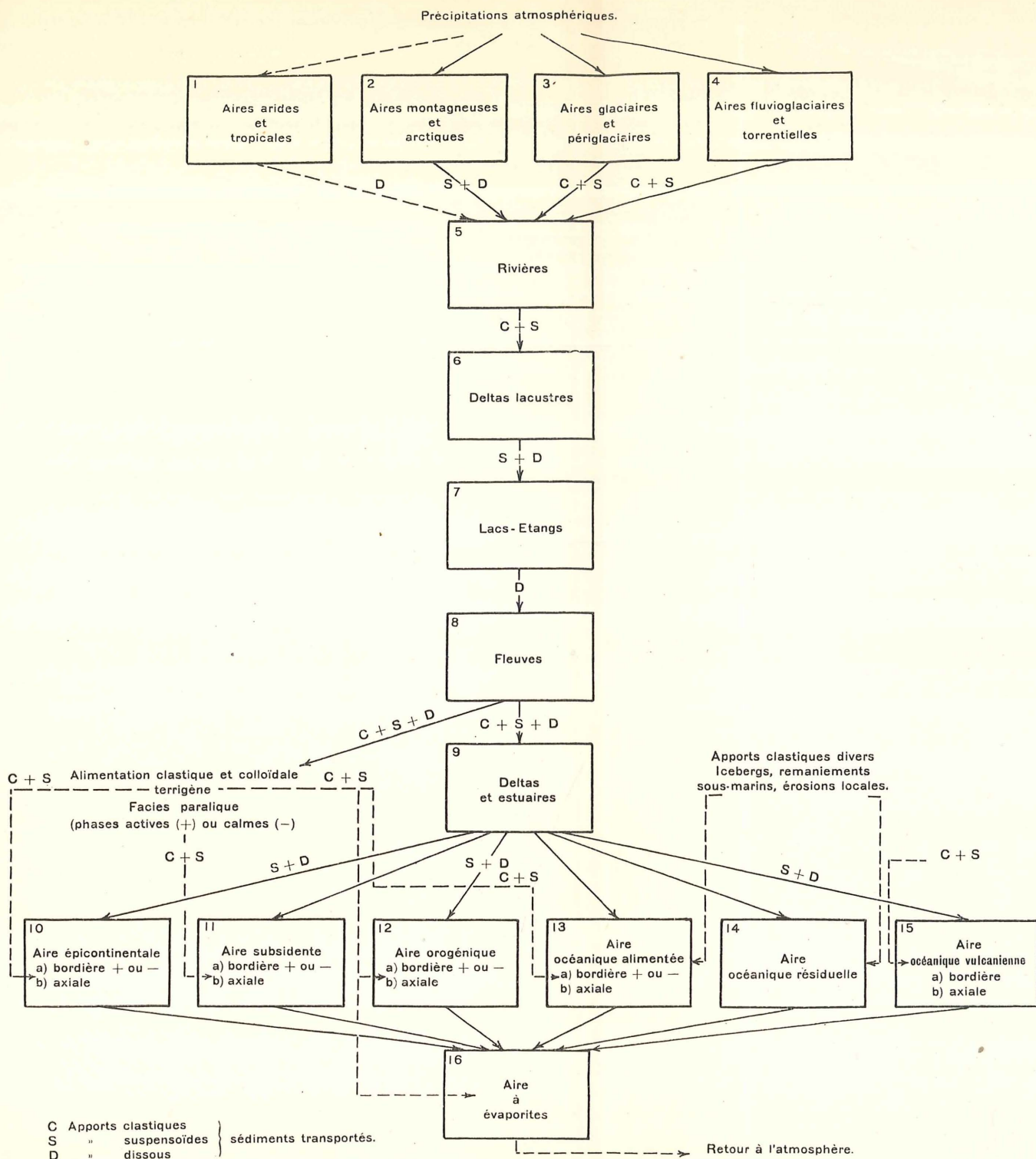
CONCLUSIONS.

Cette étude a pour objet d'établir un cadre pour les observations souvent isolées et dispersées dans le domaine de l'étude des roches sédimentaires. Après une revue de nombreuses classifications, il a été possible de conserver une systématique des roches basée sur des critères descriptifs de structure ayant une parenté marquée avec des critères génétiques. Critères génétiques et critères descriptifs seront appliqués à l'analyse des séries sédimentaires pour en préciser l'histoire.

Seules ces applications démontreront la validité du cadre proposé, qui jusqu'à ce moment n'aura qu'une valeur d'introduction.

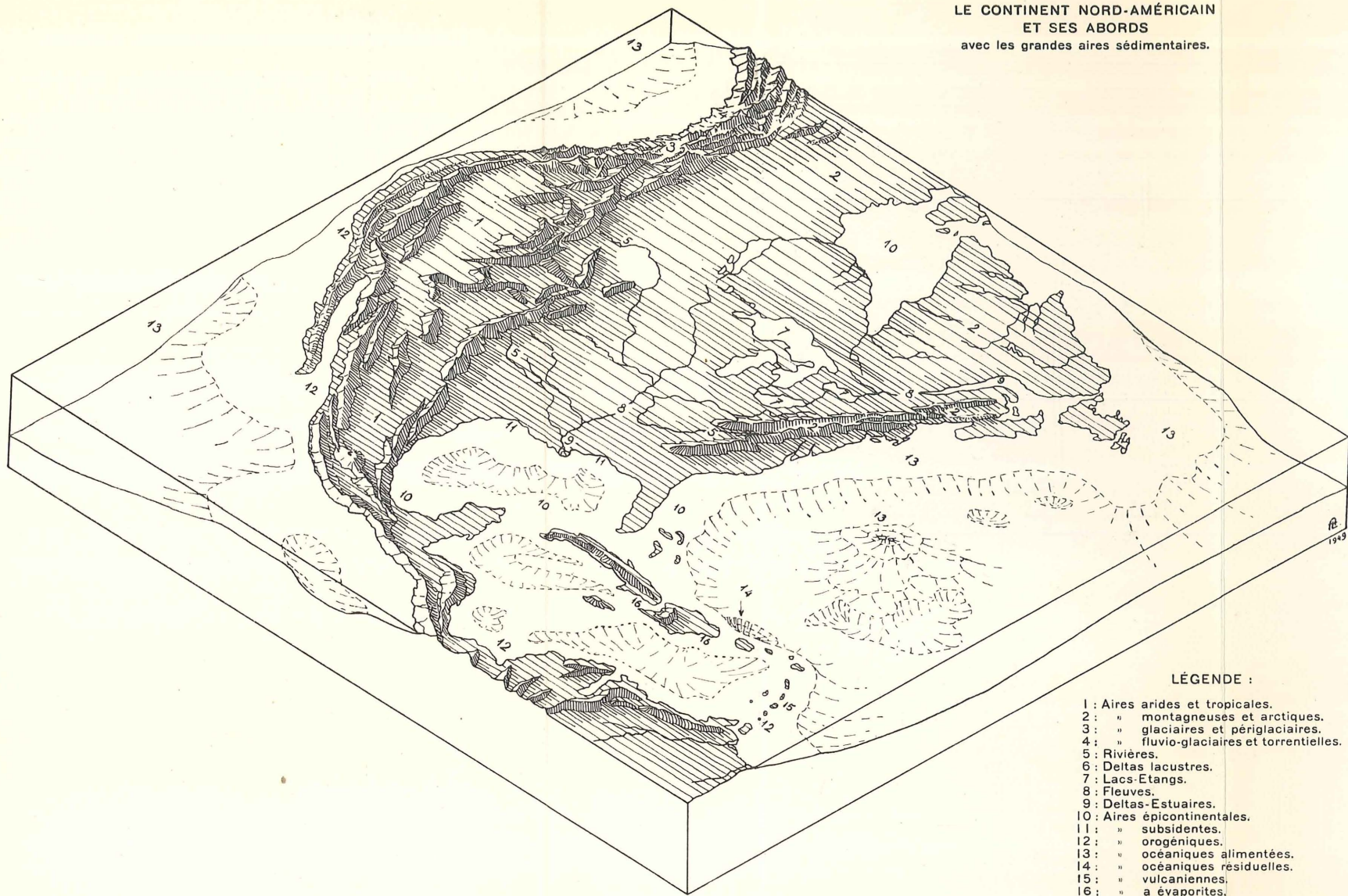
BIBLIOGRAPHIE.

1. ALLING, H. L., A metric grade scale for sedimentary rocks (*Journ. of Geol.*, vol. 41, pp. 259-269, 1943).
2. BACON, CH. S. Jr, Applications of the Niggli-Becke projection for rock analyses (*The Amer. Mineralogist J. Min. Soc. Am.*, vol. 32, n° 5 and 6, pp. 257-295, May-June 1947).
3. BARTH, F. W., CORRENS, C. W., ESKOLA, P., Die Entstehung der Gesteine, Berlin, 1939.



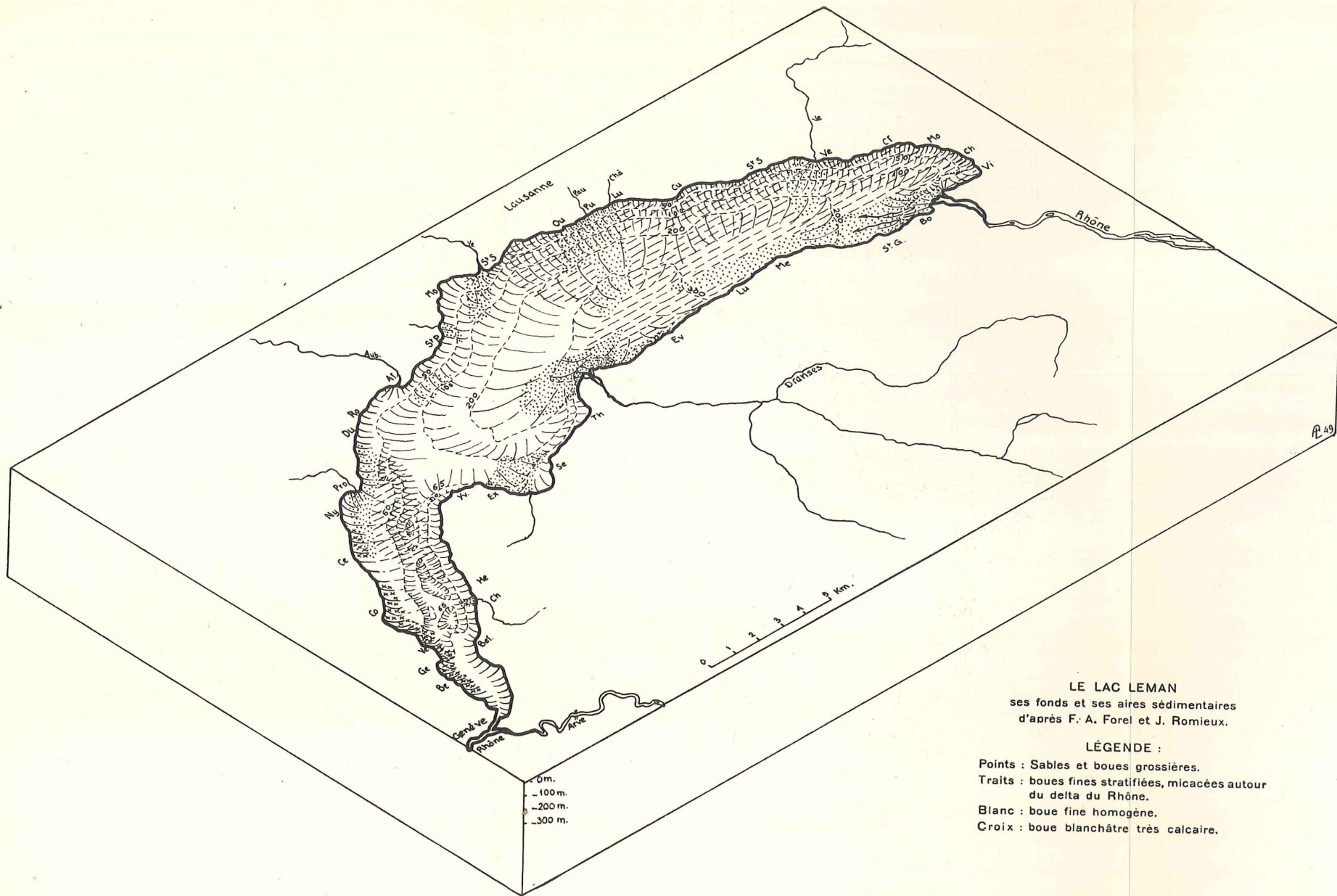
LES AIRES PALÉOSÉDIMENTAIRES ET LEUR ALIMENTATION
 EN FONCTION DU CYCLE DE L'EAU

LE CONTINENT NORD-AMÉRICAIN
ET SES ABORDS
avec les grandes aires sédimentaires.



LÉGENDE :

- 1 : Aires arides et tropicales.
- 2 : " montagneuses et arctiques.
- 3 : " glaciaires et périglaciaires.
- 4 : " fluvio-glaciaires et torrentielles.
- 5 : Rivières.
- 6 : Deltas lacustres.
- 7 : Lacs-Etangs.
- 8 : Fleuves.
- 9 : Deltas-Estuariers.
- 10 : Aires épicontinentales.
- 11 : " subsidentes.
- 12 : " orogéniques.
- 13 : " océaniques alimentées.
- 14 : " océaniques résiduelles.
- 15 : " volcaniennes.
- 16 : " a évaporites.



LE LAC LEMAN
 ses fonds et ses aires sédimentaires
 d'après F. A. Forel et J. Romieux.

- LÉGENDE :
- Points : Sables et boues grossières.
 - Traits : boues fines stratifiées, micacées autour du delta du Rhône.
 - Blanc : boue fine homogène.
 - Croix : boue blanchâtre très calcaire.

4. BIETLOT, ALB., Méthodes d'analyse granulométrique. Application à quelques sables éocènes belges (*Ann. Soc. géol. Belg.*, t. LXIV, fasc. 2, M. 81, Liège, 1940-1941).
5. BURCART, J., Essai d'une classification raisonnée des matériaux meubles (*B.S.G.F.*, 5^e série, t. XI, n^o 1, pp. 117-153, 5 mai 1941).
6. — Aide-mémoire de Géologie appliquée aux travaux publics, édit. Eyrolles, Paris, 1944.
7. — La sédimentation dans la Manche (*Géologie des terrains récents dans l'Ouest de l'Europe*, Sess. extr. Soc. belges Géol., pp. 14-43, 19-26 septembre 1946).
8. CAHEN, L., Les « grès » de l'Étage supérieur du Kundelungu supérieur (à propos de l'horizon repère) (*Bull. Soc. belge Géol.*, t. LVII, fasc. 2, pp. 425-444, 1948).
9. CAILLEUX, ANDRÉ, Lithologie des dépôts émergés actuels de l'embouchure du Var au cap d'Antibes (*Bull. Inst. Océanogr.*, n^o 940, Monaco, novembre 1948).
10. — Granulométrie des formations à galets (*Géologie des terrains récents dans l'Ouest de l'Europe*, Sess. extr. Soc. belges Géol., 19-26 septembre 1946, Bruxelles, 1947).
11. CAROZZI, ALB., Méthode de détermination des oscillations tectoniques en milieu de sédimentation calcaire. Définition de l'indice de sensibilité tectonique en milieu de sédimentation calcaire. Définition de l'indice d'intensité tectonique en milieu de sédimentation calcaire (*Arch. d. Sciences*, vol. I, fasc. 2, pp. 402-408, Genève, 1948).
12. CAYEUX, L., Contribution à l'étude micrographique des terrains sédimentaires (*Mém. Soc. géol. Nord*, IV, Lille, 1897).
13. — Causes anciennes et causes actuelles en géologie, Masson et C^{ie}. Paris, 1941.
14. DAPPLES, E. C., Landstones types and their associated depositional environments (*J. of Sedimentary Petrology*, vol. 17, n^o 3, pp. 91-100, décembre 1947).
15. DENAEYER, M., Tableau de classification des roches sédimentaires, non publié, Univ. Libre de Bruxelles, Labor. de Minéralogie, 1948.
16. DREYFUSS, MAURICE, Guide pratique du géologue de terrain, Montpellier, 1946.
17. DUPARQUE, A., Structure microscopique des charbons du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais (*Mém. Soc. géol. Nord*, t. XI, pp. 285-340, 1933).
18. — Des rôles respectifs de l'examen microscopique et de l'analyse chimique dans l'étude pétrographique des houilles paléozoïques (*Ibid.*, t. LXVI, pp. 15-30, 1946).
19. — Hétérogénéité et discontinuité des veines de houilles. Remarques complémentaires sur l'analyse immédiate des houilles et leur mode de formation (*Ibid.*, t. LXVI, pp. 34-62, Lille, 1946).

20. DUPARQUE, A., Sur les classifications techniques chimiques et pétrographiques des houilles (*Ibid.*, t. LXVI, pp. 110-122, Lille, 1946).
21. FICHTER, H. J., Geologie der Bauen-Brisen Kette (*Mat. Carte géol. Suisse*, nouv. série, 69^e livr., Berne, 1934).
22. FILIPESCO, M.-G., Un essai de classification des roches sédimentaires (*Bull. Lab. Min. Univ. Bucuresti*, vol. I, 1934).
23. FOURMARIER, P., Principes de Géologie, 2 vol., Liège et Paris, 1944.
24. GEIGER, E., Sedimentpetrographische Untersuchungen der oberen Süßwassermolasse und der pleistocaenen Ablagerungen im Thurgau (*Geol. Atl. d. Schweiz*, 1: 25.000, Erläuterungen Geol. Komm. d. S.N.G., Berne, 1943).
25. GEIKIE, J., *Traité pratique de Géologie*, trad. franç. de P. Lemoine, Paris, 1910.
26. GLANGEAUD, LOUIS, Corrélations statistiques, classification et hiérarchie des facteurs intervenant dans la formation des sédiments (*B.S.G.F.*, 5^e série, t. XI, nos 7-9, p. 371, Paris, 1941).
27. GRABAU, W., *Principles of Stratigraphy*, 1913.
28. GULINCK, M., Sur la précision des analyses granulométriques par tamisage (*Bull. Soc. belge Géol.*, t. LII, pp. 206-213, 1943).
29. HATCH, F. H., RASTALL, R. M., BLACK, M., *The petrology of the sedimentary rocks*, London, 1938.
30. JAMOTTE, A., La lithologie graphique. Ses applications à l'étude géologique du Katanga (*Bull. Assoc. Ing. Fac. Techn. Hainaut*, Mons, n^o 6, avril 1944).
31. KAYSER, EM., *Lehrbuch der Geologie*, Stuttgart, 1923.
32. KRUMBEIN, W. C., Graphic presentation and statistical analysis of sedimentary data, in: P. TRASK, *Recent Marine sediments. A symposium*, Am. Ass. Petr. Geol. Tulsa Okla and Murby, London, 1939.
33. — *J. of sedimentary petrology*, vol. 17, n^o 3, décembre 1947.
34. KRYNINE, P. D., Diastrophism and the evolution of sedimentary rocks (*Penn. State College*, Techn. Paper, April-June 1943).
35. — The megascopic study and field classification of sedimentary rocks (*Journ. of Geol.*, vol. 56, n^o 2, p. 130, janvier-novembre 1948).
36. MARR, J. E., Classification of sedimentary rocks (*Quart. J. Geol. Soc.*, vol. 61, p. LXII, Presidential adress, 1905).
37. VON MOOS, A., Sedimentpetrographische Untersuchungen an Molasse-sandsteinen (*Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, Bd XV, Heft 2, pp. 170-265, 1935).
38. NIGGLI, P., Tabellen zur Petrographie und zum Gesteinsbestimmen (*Min. Petr. Inst. Eidg. Tech. Hochschule*, Zürich, 1934).
39. — Die charakterisierung der klastischen Sedimente nach der Kornzusammensetzung [*Schweiz. Min. Petr. Mitt.*, 15 (1935), 31 (*sic*)].

40. PAREJAS, E. et LILLIE, A., Données micrographiques sur le Crétacé supérieur de Vormy (Aravis, Haute-Savoie) (*C. R. séances Soc. de Phys. et d'Hist. naturelle*, vol. 52, n° 3, pp. 275-277, Genève, 1935).
41. — — Données micrographiques sur le Crétacé supérieur de Châtelard-en-Bauges (Savoie) (*Ibid.*, vol. 52, n° 3, pp. 272-275, Genève, 1935).
42. PETTIJOHN, F. J., *Sedimentary rocks*, Harper and Bros, New-York, 1949.
43. PRATJE, O., Die Ausdeutbarkeit der Sedimente (*Geol. Rundschau*, Bd 29, pp. 168-174, 1938).
44. RINNE, F., La science des roches, 3^e édit. française, trad. L. Bertrand, Ed. Lamarre, Paris, 1928.
45. SHROCK, R. R., A classification of sedimentary rocks (*Journ. of Geology*, vol. 56, p. 118, janvier-novembre 1948).
46. SLOSS, LAWRENCE L., Environments of limestone deposition (*Journ. of Sed. Petrology*, vol. 17, n° 3, pp. 109-113, décembre 1947).
47. SVERDRUP, H. O., JOHNSON, M. W., FLEMING, R. H., *The Oceans*, Prentice-Hall, inc. New-York, 1946.
48. TERCIER, J., Dépôts marins actuels et séries géologiques (*Eclog. geol. Helvetiae*, n° 32, pp. 47-98, 1939).
49. TROWBRIDGE, A. C., A classification of common sediments and some criteria for identification of the various classes (*Journ. Geol.*, vol. 22, pp. 420-436, 1914).
50. TWENHOFEL, W. M., The environmental significance of conglomerates (*Journ. of Sed. Petrology*, vol. 17, n° 3, pp. 119-128, décembre 1947).
51. — — *Treatise on sedimentation*, 2^e édit., Baltimore, 1932.
52. VAN RIEL, P. M., The Snellius Expedition (Conseil perm. internat. p. l'Exploration de la Mer, *Journ. du Conseil*, V, 7, pp. 212-217, 1932).
53. VUAGNAT, MARC, Quelques réflexions à propos de la planimétrie des microconglomérats en plaques minces (*Bull. Lab. Géol. Min. Géophys. Mus. Géol. Univ. Lausanne*, n° 90, pp. 12-16, Lausanne, 1948).
54. ZINGG, TH., *Beitrag zur Schotteranalyse*, thèse, Zürich, 1935.