

SÉANCE MENSUELLE DU 20 MAI 1952.

Présidence de M. I. DE MAGNÉE, vice-président.

Sur la proposition du Président, sont admis en qualité de membres effectifs :

MM. FERNAND CHARLIER, 34, avenue de la Floride, Bruxelles; présenté par MM. A. Delmer et R. Cambier.

PIERRE DRUART, Étudiant, 315, rue Vandervelde, à Cuesmes; présenté par MM. F. Racheneur et R. Cambier.

ANDRÉ GHEUR, Étudiant, 21, rue Rimaux, Hautrage-État; présenté par MM. F. Racheneur et R. Cambier.

Dons et envois reçus :

De la part des auteurs :

- 10593 ... Esquisse géologique et hydrogéologique du département du Rhône. Niort, 1952, 42 pages et 1 figure.
- 10594 ... Fouilles et trouvailles. Dijon, 1950, 5 pages et 2 figures.
- 10595 *Anderson, E. M.* The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain. Edinburgh et Londres, 1951, 206 pages et 39 figures.
- 10596 *Camerman, C.* Les pierres de taille calcaires. Leur comportement sous l'action des fumées. Bruxelles, 1952, 103 pages et 45 figures.
- 10597 *Combiér, J. A.* Typologie du Périgordien final mâconnais. La Sénetrière. Fouilles de 1928. ?, 1950, 7 pages et 2 figures.
- 10598 *Combiér, J. A.* Procédés campigniens de débitage à Alix (Rhône). ?, 1951, 3 pages et 1 figure.
- 10599 *David, L.* Quelques bryozoaires nouveaux du Miocène du Gard et de l'Hérault. Paris, 1949, 8 pages et 1 planche.
- 10600 *David, L.* Présence de la structure « beef » et « cone-in-cone » dans le Crétacé de l'Est-Constantinois (Algérie). Paris, 1952, 2 pages.

- 10601 *Donze, P.* Existence du faciès purbeckien sur le Causse Méjean dans la région de La Parade (Lozère). Paris, 1951, 2 pages.
- 10602 *Donze, P.* Les formations de la limite Jurassique-Crétacé dans les massifs subalpins des Bauges et de la Chartreuse. Paris, 1951, 3 pages.
- 10603 *Donze, P.* Présence de calcaires lacustres dans le Virgilien de la Montagne-de-l'Épine (Jura méridional). Paris, 1951, 2 pages.
- 10604 *Gauthier, H.* Sur l'Oligocène de la vallée de l'Oued Bades (versant Sud du Haut-Atlas marocain). Paris, 1951, 2 pages.
- 10604 *Gauthier, H.* Sur le Pliocène et le Quaternaire de la région d'Ouarzazate (versant continental Sud du Haut-Atlas marocain). 2 pages.
- 10604 *Gauthier, H.* Sur le Miocène continental et les mouvements post-pontiens dans le synclinal des Khelas (Maroc méridional). Paris, 1951, 2 pages.
- 10605 *Gauthier, H.* Les formations de passage du Crétacé à l'Éocène dans les bassins du Cadès et du Todra (Sud du Haut-Atlas marocain). Paris, 1952, 2 pages.
- 10605 *Gauthier, H.* Observations sur le Crétacé supérieur de la zone des Khelas et de la sous-zone subatlasique méridionale (Sud marocain). Paris, 1952, 2 pages.
- 10606 *Jones, L.* Gravimétrie. Les anomalies isostatiques en Belgique. Bruxelles, 1951, 6 pages et 3 cartes.
- 10607 *Jones, L.* Deuxième nivellement général. Fascicule I. Annexe. Note sur surfaces de niveau zéro existant en Belgique. Bruxelles, 1952, 19 pages et 4 figures.
- 10608 *Leriche, M.* Les poissons tertiaires de la Belgique (supplément). Bruxelles, 1951, 127 pages et 6 planches.
- 10609 *Pelletier, M.* L'âge des calcaires à entroques et des calcaires du Bajocien dans le Jura méridional. Paris, 1950, 3 pages.
- 10610 *Pelletier, M.* Étude de quelques polypiers bajociens du Jura méridional. Paris, 1951, 8 pages et 1 planche.
- 10611 *Thoral, M.* Albert-Frédéric Roman, Professeur honoraire de la Faculté des Sciences de Lyon (1871-1943). Lyon, 1944, 43 pages et 1 photo.
- 10612 *Thoral, M.* et *Bourdier, F.* Sur le mode de formation et l'âge des alluvions dites préglaciaires aux environs de Lyon. Paris, 1949, 2 pages.
- 10613 *Thoral, M.* et *Gauthier, H.* Les lèss autour du Mont-d'Or lyonnais. Paris, 1949, 3 pages.
- 10614 *Thoral, M.* et *Ricour, J.* Examen de quelques échantillons provenant du sondage de Torcieu (Ain) et conservés au Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Lyon. Paris, 1950, 2 pages.

- 10615 *Van Leckwyck, W., Demanet, F., Willière, Y. et Chaudoir, H.* Étude géologique du gisement houiller d'Andenne-Huy. Le Namurien dans le bassin d'Andenne. Bruxelles, 1952, 107 pages et 4 planches.
- 10616 *Veyrier, M., Beaux, Ed. et Combier, J.* Grotte de Néron, à Soyons (Ardèche). Les fouilles de 1950. Leurs enseignements. ?, 1951, 10 pages et 1 planche.
- 10617 *Viret, J.* *Meles thoralis* s. sp. du lœss villafranchien de Saint-Vallier (Drôme). Bâle, 1950, 14 pages et 6 figures.
- 10618 *Viret, J.* Commentaires sur l'espèce en paléontologie. Paris, 1951, 9 pages et 2 figures.
- 10619 *Viret, J. et Gauthier, H.* Sur l'âge des calcaires de Saint-Menoux (Allier). Paris, 1950, 2 pages.

Divers :

M. G. MORTELMANS annonce que le Professeur PETERSON, de l'Université de Göteborg, assurera très prochainement, au Laboratoire de Géologie de l'Université de Bruxelles, deux conférences auxquelles les membres de la Société sont spécialement invités.

Les sujets traités seront : le lundi 26 juin, à 17 heures : Les sédiments de mer profonde, et le mardi 27 juin, à 17 heures : La radioactivité des sédiments marins.

Communications des membres :

L. DE LEENHEER. — *L'analyse granulométrique avec l'hydromètre à chaîne. Nouvelle technique à la fois rapide et précise.* (Texte ci-après.)

I. DE MAGNÉE. — *La radioactivité des argiles belges.* (Texte ci-après.)

G. MORTELMANS. — *Observations nouvelles sur les « porphyroïdes » caradociens de la gare d'Hennuyères.* (Texte ci-après.)

P. DE SAINT-SEINE, L. CAHEN et J. LEPERSONNE. — *L'âge de l'étage de Stanleyville (Série du Lualaba) et ses conséquences sur la stratigraphie du Congo.* (Texte ci-après.)

Analyse granulométrique avec l'hydromètre à chaîne (*).

NOUVELLE TECHNIQUE RAPIDE ET PRÉCISE ()**,

par L. DE LEENHEER, Dr Sc., et L. MAES, Ing. Chim. Agr.

INTRODUCTION.

Le mérite d'avoir introduit le densimètre dans la pratique courante pour l'analyse granulométrique des sédiments meubles et des sols revient à Bouyoucos.

L'hydromètre employé par lui était étalonné empiriquement pour permettre la lecture directe de la concentration de la suspension, en grammes par litre. Le densimètre de Bouyoucos donne ainsi rapidement le résultat, mais d'une façon approximative seulement; son emploi est à déconseiller pour des analyses granulométriques précises. Un des désavantages majeurs de ce type d'hydromètre consiste dans le fait que la concentration de la suspension n'est pas déterminée à une profondeur constante, celle-ci variant avec la concentration.

D'autre part, il est bien connu que toute mesure gravimétrique s'effectue avec bien plus de précision qu'une mesure volumétrique. C'est pourquoi les balances analytiques n'ont jamais encore été dépassées pour la détermination de densités, l'emploi de l'hydromètre n'étant justifié qu'à cause du gain de temps et de la facilité de son emploi. La mise au point d'une technique employant un hydromètre à chaîne devrait alors permettre de combiner, d'une part, la précision de la balance analytique, d'autre part, le gain de temps du densimètre; si en plus l'hydromètre pouvait être plongé à une profondeur déterminée et constante, cette technique deviendrait quasi idéale.

I. — DESCRIPTION DE L'HYDROMÈTRE A CHAÎNE.

L'hydromètre à chaîne construit par nous est représenté sur les figures 1 à 3, ensemble avec son montage, permettant des analyses en grandes séries.

(*) Texte remis à la séance.

(**) Recherche subsidiaire par l'Institut pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture.

La boule à immersion est la boule d'une pipette de 100 ml, refondue dans sa partie inférieure et alourdie par l'introduction d'une quantité déterminée de mercure. La tige, qui est fixée à la boule à l'aide de cire à cacheter, présente la forme indiquée sur la figure 1.

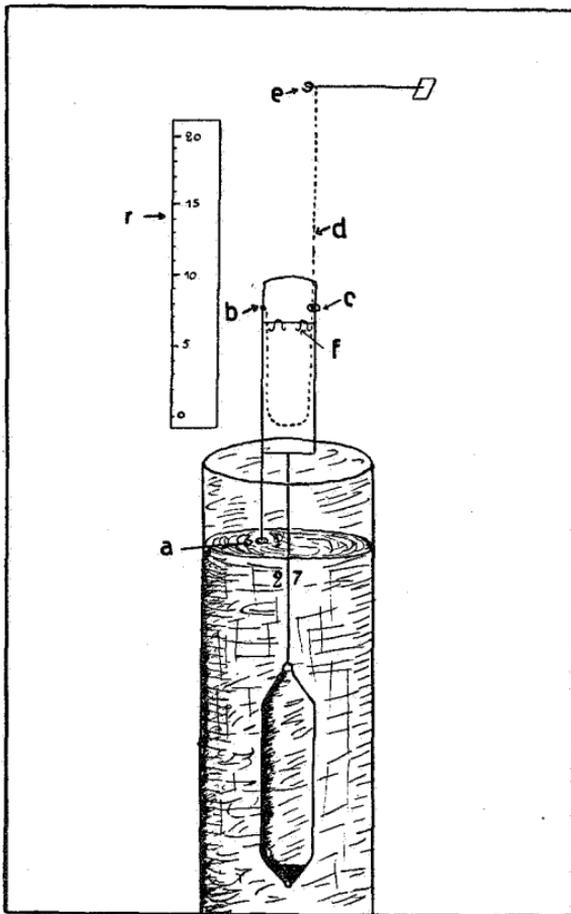


FIG. 1. — Le principe de l'hydromètre à chaîne.

Cette tige comprend une aiguille, *a*, permettant d'introduire l'hydromètre dans la suspension à une profondeur constante, celle-ci étant la profondeur au moment où l'aiguille touche la surface de la suspension, lors de l'introduction de l'hydromètre dans les cylindres de sédimentation. De cette façon on acquiert une précision d'immersion d'une fraction de millimètre.

A sa partie supérieure la tige comprend un crochet, *b*, et un

anneau, *c*, une chaînette légère et très fine, *d*, est suspendue au crochet, décrit une courbe pour passer à travers l'anneau et est suspendue à son autre extrémité au crochet, *e*, ce dernier pouvant être monté ou descendu le long d'une échelle divisée en cm et mm. La chaînette en argent employée par nous pré-

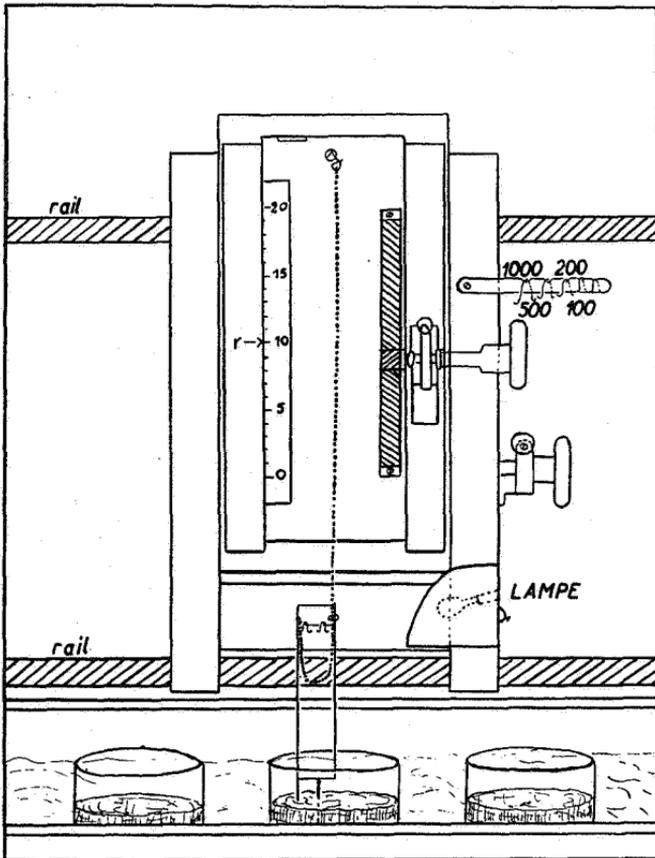


FIG. 2. — Le montage de l'hydromètre à chaîne.

sente un poids tel qu'une descente de 1,8 cm correspond à une surcharge de l'hydromètre de 10 mg. De cette façon la descente de la chaînette à son maximum correspond à une augmentation en poids de l'hydromètre de plus de 100 mg.

Des poids supérieurs peuvent être ajoutés directement à l'aide de cavaliers, qui sont placés sur une petite tige transversale *f*.

La mise à zéro est rendue possible en mettant l'échelle milli-

métrique au point de départ (c'est-à-dire zéro) et en élevant ensuite tout ce montage d'hydromètre ensemble avec son échelle graduée à une hauteur déterminée à l'aide d'une seconde vis de montage (voir fig. 2):

Cette dernière hauteur constante est facilement contrôlée en mettant un nœud au moyen d'un fil blanc à coudre en un point

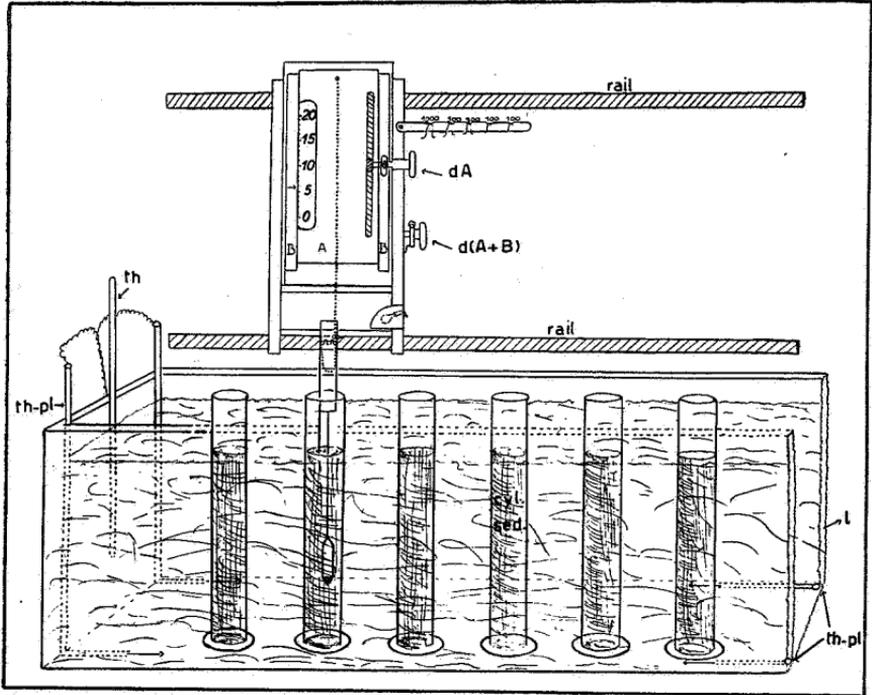


FIG. 3. — Analyses en série avec l'hydromètre à chaîne.

donné de la chaînette, le nœud étant alors monté ou descendu jusqu'au moment où il se trouve à l'intérieur de l'anneau *c*.

La détermination de la densité de la suspension se réalise de la façon suivante : on introduit prudemment l'hydromètre dans la suspension en évitant au maximum les remous dans le liquide; on ajoute de petits cavaliers pour obtenir une surcharge connue et telle que l'aiguille *a* se trouve à faible distance (1 à 2 cm) de la surface du liquide; on réalise ensuite la mise à zéro en mettant l'échelle au zéro de départ, tout en plaçant le petit nœud blanc dans la chaînette à l'intérieur de l'anneau *c*. A l'aide de la vis permettant le déplacement de la

chaînette on augmente le poids de l'hydromètre jusqu'à ce que son aiguille touche la surface du liquide. Il importe d'effectuer la mise à zéro immédiatement avant la lecture finale de la densité, sinon les particules en suspension auraient le temps de se déposer sur la partie supérieure de la boule du densimètre, provoquant ainsi un résultat fautif. Dans la pratique on n'a aucune difficulté pour réaliser la mise à zéro une demi-minute avant le temps requis pour la lecture définitive.

II. — CALCUL DE LA CONCENTRATION DE LA SUSPENSION.

Il est facile de déterminer le volume exact de l'hydromètre V en le plongeant dans un liquide de densité connue, notamment l'eau distillée; d'autre part, on connaît également le poids, Gt, de l'hydromètre au moment où il est en équilibre avec la suspension étudiée, c'est-à-dire au moment où l'aiguille touche la surface du liquide; on en déduit la densité de la suspension, Ds, pour une profondeur déterminée et à un temps donné, ce dernier correspondant au temps de sédimentation pour la fraction granulométrique qu'on veut connaître.

$$D_s = \frac{G_t}{V}.$$

La quantité de sol ou de sédiment meuble en suspension, exprimée en grammes par litre, est donnée par la formule

$$\text{gr/l} = \frac{1000 D_g (D_s - D_m)}{D_g - D_m},$$

dans laquelle

D_g = densité du sol ou du sédiment,

D_s = densité de la suspension,

D_m = densité du milieu dans lequel s'effectue la suspension.

La valeur D_m est connue :

$$D_m = D_e + d_p,$$

D_e étant la densité de l'eau,

d_p étant l'augmentation de la densité par suite de l'addition du liquide de peptisation; cette valeur d_p s'établit expérimentalement.

Dans les déterminations effectuées par nous, le liquide de peptisation s'obtient par la dissolution de 13,399 g d'oxalate de sodium et de 2,12 g de carbonate de sodium par litre; la quantité de liquide de peptisation ajoutée dans chaque cylindre étant de 50 ml, la valeur dp est une constante : 0,0005868.

On obtient ainsi :

$$\text{gr susp./litre} = \frac{(1000 Dg - Ds - De - 0,0005868)}{(Dg - De - 0,0005868)}.$$

III. — PRÉCISION DE LA MÉTHODE.

Les erreurs commises avec l'hydromètre à chaîne peuvent se diviser en deux groupes : les erreurs expérimentales et les erreurs théoriques propres à l'emploi de l'hydromètre.

A. — LES ERREURS EXPÉRIMENTALES.

1. La dispersion des particules de sols doit être complète et toute la matière organique doit être détruite. Comme cette source d'erreur revient également dans la méthode de la pipette (la plus couramment appliquée actuellement), nous n'en tiendrons pas compte lors de la confrontation des deux techniques.

2. L'immersion de l'hydromètre doit se réaliser sans provoquer un remous de la suspension.

La comparaison des résultats obtenus d'une part avec l'hydromètre, d'autre part avec la pipette sur une même suspension de sol nous permettra de nous faire une idée de l'importance de cette source d'erreur. Signalons dès à présent que les nombreux résultats signalés plus loin nous permettent de déduire que les remous provoqués dans la suspension par l'introduction prudente de l'hydromètre ne dépassent pas notablement ceux provoqués par l'introduction de la pipette.

3. La sédimentation doit s'effectuer en l'absence de l'hydromètre. La technique de l'hydromètre ne convient pas pour une détermination continue de la sédimentation, qui consisterait à laisser l'hydromètre dans la suspension, en faisant régulièrement des lectures de densité. Ce mode opératoire provoquerait de grandes erreurs, du fait que de nombreuses particules solides se déposeraient sur la boule de l'hydromètre, provoquant une surcharge inconnue.

Il importe dès lors d'introduire l'hydromètre immédiatement avant la lecture de la densité. Dans la pratique cette condition ne se réalise qu'approximativement, un minimum de temps étant nécessaire pour la mise à zéro et la lecture elle-même. On peut en déduire que l'erreur lors de la détermination de la fraction 0.2μ sera plus petite que celle sur la fraction 0.10μ ou sur la fraction de 0.20μ , le temps nécessaire pour effectuer la première détermination étant nettement inférieur par rapport au temps de la sédimentation.

4. La lecture de la densité doit se faire au moment correspondant exactement au temps de sédimentation requis pour la fraction à déterminer. Ici également tout écart provoquera une erreur relativement plus grande pour la fraction 0.20μ que pour la fraction 0.2μ . La lecture de la densité peut cependant se faire exactement en quelques secondes, ce qui nous permet de conclure que cette source d'erreur est négligeable, même pour la fraction de 0.20μ .

En effet, nous savons par expérience que la lecture de densité se réalise facilement et exactement en moins de 5 secondes; si nous appliquons la loi de Stokes à cet écart de 5 secondes, nous constatons que pour la limite granulométrique de 20μ la lecture de densité se fait à la valeur de $20,09 \mu$ si la lecture est faite 5 secondes trop tôt, et à la valeur de $19,91 \mu$ si la lecture est faite 5 secondes trop tard.

L'erreur ($\pm 0,09 \mu$), exprimée en % de la fraction, varie avec l'inclinaison de la courbe cumulative à la valeur de 20 microns.

Nous exprimons cette inclinaison par un gradient.

Si nous mettons en ordonnées le pourcentage sur une échelle arithmétique et en abscisse le diamètre des grains sur une échelle logarithmique, le gradient, dans le cas de l'exemple représenté sur la figure 4, devient :

$$\text{gradient} = \text{Tg} \alpha = \frac{BC}{AC} = \frac{41 - 27}{35 - 15} = 0,7.$$

Même si l'on prend comme gradient la valeur 2 (qui est un gradient très élevé, peu commun dans la pratique), l'erreur n'atteindrait que 0,18 %; cette erreur est certainement plus faible que l'erreur globale sur l'analyse mécanique. Un écart de 5 secondes vis-à-vis du temps exact de sédimentation peut donc être considéré comme admissible, même pour la fraction de

0-20 μ ; pour la fraction 0-10 μ cette erreur devient très faible et elle est tout à fait négligeable pour la fraction 0-2 μ .

5. En vue d'obtenir des résultats exacts il faut absolument que les déterminations se fassent à une température constante, si l'on veut éviter d'introduire des corrections de température. La formule permettant le calcul de la quantité de suspension en présence mentionne la densité de l'eau; cette formule permet

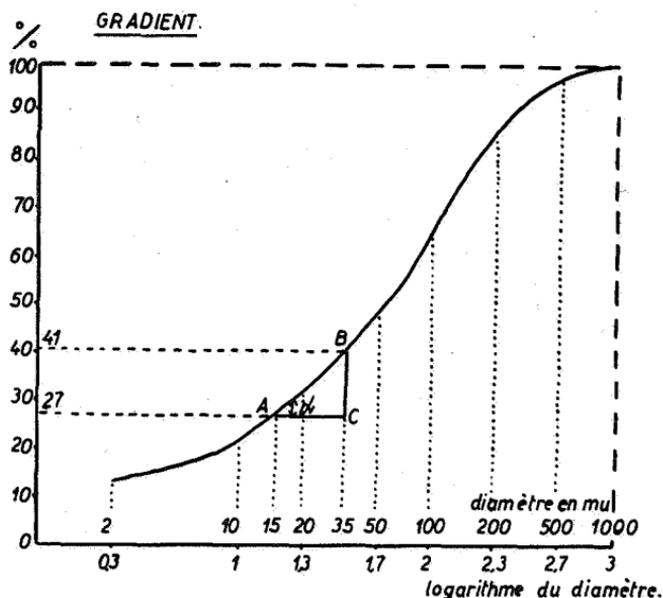


FIG. 4. — Gradient d'une courbe cumulative.

de calculer qu'un écart de température de 1° C constitue une erreur relativement importante.

Prenons comme exemple une lecture de densité effectuée en réalité à la température de 19°, mais calculée pour une température de 20°. La densité de l'eau pour ces deux températures présente une différence de 0,000202. Cette différence provoque après calcul une différence en quantité de matière suspendue de 0,32 g par litre.

L'analyse granulométrique étant effectuée sur 20 g, cet écart signifie une erreur de 1,6 % sur la fraction considérée.

Dans la formule signalée antérieurement, le volume de l'hydromètre est supposé constant; l'hydromètre étant un instru-

ment très sensible, les variations de température provoquent des contractions ou expansions de la boule d'immersion, qui nécessitent une correction négative ou positive.

Soit V_t le volume de l'hydromètre à la température t , le volume $V_{t'}$ à toute température différente s'obtient par la formule

$$V_{t'} = V_t [1 + \sigma (t' - t)],$$

dans laquelle σ représente le coefficient d'expansion cubique du matériel. Une seule détermination du volume à une température donnée permet le calcul du volume à une température quelconque; cependant il est souhaitable de déterminer le volume par voie expérimentale à différentes températures et de confronter les résultats avec les valeurs calculées.

Nous estimons nécessaire de mesurer également la température avec une précision de $0,1^\circ \text{C}$ et d'en tenir compte, aussi bien pour la densité de l'eau que pour le volume de l'hydromètre, lors du calcul de la quantité de la matière en suspension.

En pratique il est hautement préférable de déposer les cylindres de sédimentation dans un réservoir d'eau à double paroi (couche isolante de liège) dont la température peut être maintenue constante à un $0,1^\circ \text{C}$ près à l'aide de thermo-plongeurs, ces derniers ayant une longueur égale à celle du réservoir d'eau. Cette façon d'opérer constitue un gain de temps énorme, tout en présentant l'avantage de réduire simultanément les erreurs propres à la formule de Stokes. Faisons remarquer ici qu'une variation de 1° peut provoquer une erreur de $0,5\%$ sur la fraction considérée.

En résumé nous pouvons conclure que si la température est maintenue constante avec une précision de $0,1^\circ \text{C}$, l'erreur théorique qui est encore possible à cause des petits écarts de température (inférieurs à $0,1^\circ$) sera plus petite que $0,15\%$; pareille erreur peut être négligée.

6. On peut se poser la question si la friction de l'hydromètre le long de la paroi du cylindre de sédimentation ou la friction de la chaînette dans l'anneau n'est pas susceptible de provoquer des erreurs importantes.

En vue d'y répondre, nous avons effectué un grand nombre de déterminations dans des solutions homogènes de sels.

L'écart maximum de lecture constaté lors de ces essais s'élevait à 3 mm . Une longueur de la chaînette de 3 mm correspond approximativement à un poids de 2 mg , c'est-à-dire à une

précision de densité de 0,00002. Exprimée en poids de particules suspendues, l'erreur correspond à 0,032 g par litre ou 0,16 % sur la fraction considérée.

Cette erreur de 0,16 % est donc à interpréter comme une erreur possible propre à la technique de l'hydromètre à chaîne. Faisons remarquer ici que l'erreur propre à la méthode de la pipette est nettement supérieure.

Dans cette technique il faut pipetter 10 ml de suspension, qui doivent être évaporés et pesés, et dont il faut retrancher la quantité de peptisateur ajoutée.

La détermination de chaque fraction nécessite ainsi un minimum de 2 pesées; en admettant pour chaque pesée une erreur de 1 mg, ce qui est bien faible (tombée de poussière dans les récipients lors de l'évaporation ou de la dessiccation; hygroscopicité de l'argile et du peptisateur; faible oxydation du récipient de nickel; erreur de la balance, etc), l'erreur commise sur la quantité de suspension à déterminer totalise 2 mg.

Rapportée au volume total de 1 litre, l'erreur devient ainsi 200 mg, soit une erreur de 1 % sur la fraction déterminée.

Dans la pratique, cependant, cette source d'erreur propre à la méthode de la pipette se révèle être nettement supérieure, comme le prouvent les nombreuses déterminations et confrontations qui ont été effectuées. D'autre part, ceux qui emploient la pipette savent que les autres sources d'erreurs possibles et propres à la pipette (erreur sur la profondeur lors du prélèvement de la suspension et erreur sur le temps de sédimentation) peuvent être maintenues si petites dans la pratique qu'il faut en conclure que l'erreur majeure de cette technique à la pipette consiste précisément en des erreurs de pesées ⁽¹⁾.

B. — ERREURS THÉORIQUES PROPRES À L'HYDROMÈTRE.

Les erreurs théoriques peuvent être groupées en deux types. Le premier type d'erreurs se présente lorsque le diamètre des particules, dont il faut connaître la concentration, a été mal déterminé.

(1) Toutes les erreurs signalées ci-dessus sont exprimées en % sur la fraction considérée. Si nous supposons une erreur de 1,5 %, cela signifie que dans le cas d'une fraction granulométrique de 0 à 20 μ d'un teneur de 20 % les valeurs limites peuvent atteindre 18,5 et 21,5.

Les erreurs réelles en % seront d'autant plus grandes que la fraction considérée est plus faiblement représentée.

Ce genre d'erreurs se retrouve dans toute analyse granulométrique, faisant usage de la loi de Stokes, chaque fois que la densité réelle du sol diffère de la valeur admise dans la formule.

On le retrouve également lorsque le prélèvement d'une suspension, à l'aide de la pipette, se fait à une profondeur inexacte.

Rapporté à la technique de l'hydromètre, ceci revient à dire qu'il faut connaître exactement la profondeur à laquelle on détermine la densité de la suspension.

Le second type d'erreurs ne se retrouve pas dans la méthode à la pipette. Ce genre d'erreur est celui qu'on commet lorsqu'on calcule la quantité de sol en suspension en se basant sur une densité de la matière suspendue qui est différente de la densité réelle.

1. Profondeur de la détermination.

La densité dans une suspension de sédiment augmente avec la profondeur.

La densité moyenne D , qu'on détermine avec l'hydromètre, est une valeur intermédiaire entre les densités D_1 et D_2 correspondant aux profondeurs L_1 et L_2 , qui sont respectivement situées au sommet et à la base du corps d'immersion de l'hydromètre.

La densité moyenne D correspond donc à une profondeur bien précise L , intermédiaire entre L_1 et L_2 et qu'on appelle la profondeur de détermination. I. A. Black ⁽²⁾ et M. Codoni ⁽³⁾ ont établi la formule suivante :

$$L = \frac{2}{n+3} \left[\frac{L_2(n+3)/2 - L_1(n+3)/2}{L_2 - L_1} \right]^{2/n+1}$$

Cette formule n'est exacte que pour autant qu'il soit satisfait aux trois conditions suivantes :

que l'hydromètre soit cylindrique,

(2) I. A. BLACK, Theoretical errors of Hydrometer Methods for the Mechanical analysis of soils (*The Journal of Soil Science*, Vol. 2, 1951, pp. 118-133).

(3) M. R. CODONI, Density of Soil Suspensions and the Use of Densimeter for Mechanical analysis (*Soil Science*, Vol. 56, 1943, pp. 7-18); IDEM, The Densimeter Method of Mechanical analysis (*Ibid.*, Vol. 56, 1943, pp. 423-431).

que le volume de la tige soit négligeable,
que la surface de liquide soit infinie vis-à-vis de la section horizontale de l'hydromètre.

Dans le cas où la constante n est égale à l'unité (+ 1), on constate que cette profondeur de détermination correspond au milieu de la boule de l'hydromètre, c'est-à-dire, dans ce cas :

$$L = \frac{L_1 + L_2}{2}.$$

La valeur de cette constante n dépend de l'espèce de sol; les valeurs extrêmes oscillent entre 0 et -2.

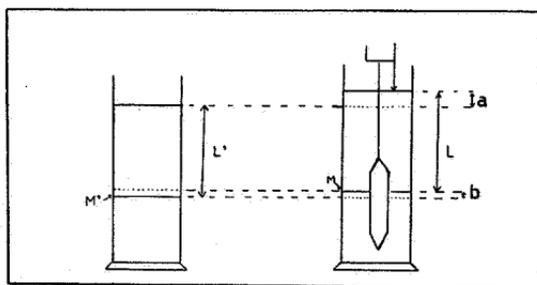


FIG. 5. — Influence de l'immersion de l'hydromètre sur la profondeur de détermination.

En réalité ceci signifie qu'il faut un sol de composition anormale pour que la profondeur de détermination corresponde au centre de la boule de l'hydromètre.

Quant à l'influence d'un volume de liquide limité dans un cylindre, celle-ci a été étudiée par Casagrande ⁽⁴⁾.

Lors de la descente de l'hydromètre dans le cylindre de sédimentation, la surface du liquide monte dans ce dernier.

La figure 5 montre clairement que cette montée de la surface du liquide correspond à une valeur

$$a = \frac{V}{Ac},$$

V étant le volume de l'hydromètre et

Ac la section horizontale du cylindre de sédimentation.

(4) CASAGRANDE, A., Die Aräometer-Methode zur Bestimmung der Kornverteilung von Böden (J. Springer, Berlin, 1934).

D'autre part, la section du liquide en un point donné M' subit une montée jusqu'au niveau M , la valeur de cette montée b étant

$$b = \frac{V}{2 A c}.$$

Un examen de la figure fait comprendre également que

$$L' = L - a + b,$$

$$L' = L - \frac{V}{A c} + \frac{V}{2 A c},$$

$$L' = L - \frac{V}{2 A c}.$$

Si L représente la distance entre le point de l'aiguille jusqu'au milieu de la boule de l'hydromètre, la profondeur réelle pour la détermination de la densité s'établit par la formule ci-dessus.

Dans la pratique il est nécessaire d'admettre une profondeur constante qui représenterait la profondeur de détermination pour tous les types de sol possibles.

Le tableau suivant, emprunté à Black, donne l'erreur exprimée en % lorsqu'on admet que la profondeur de détermination correspond au centre de la boule de l'hydromètre.

TABLEAU I.

Variation des erreurs pour différents types d'hydromètres.

R	B	Forme de l'hydromètre	N=+1	N=0	N=-1	N=-2	N=-3
	1	C.	0,0	0,3	1,0	2,9	4,0
		D.C.	0,0	0,3	0,6	0,8	1,1
0	2	C.	0,0	0,4	0,7	1,1	1,3
		D.C.	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4
	3,5	C.	0,0	0,1	0,3	0,4	0,5
		D.C.	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2
	1	C.	0,0	0,5	1,0	1,6	2,1
		D.C.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
1/3	2	C.	0,0	0,2	0,3	0,5	0,7
		D.C.	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3
	3,5	C.	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2
		D.C.	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1

Il est à remarquer que l'erreur varie avec :

1. Le rapport entre la section maximale de la boule de l'hydromètre avec la section du cylindre de sédimentation : ce rapport est représenté par le symbole R .

Nous avons pris en considération 2 valeurs, notamment 0 et $1/3$; ces deux valeurs correspondent respectivement à une section infinie de la suspension et à un cylindre dont le diamètre dépasse 1,73 fois le diamètre maximum de la boule de l'hydromètre.

Toutes circonstances étant égales, le tableau fait ressortir que l'erreur est supérieure pour une section infinie. Pour l'hydromètre construit par nous, la valeur $R = 1/3$ donne satisfaction.

2. Le rapport entre la partie de la tige qui plonge sous eau avec la longueur de la boule de l'hydromètre. Ce rapport, représenté par la lettre B , donne la profondeur relative de l'immersion.

Plus cette profondeur sera grande, plus l'erreur sera petite. Nous avons construit un hydromètre pour lequel la valeur de $B = 1$.

Une plus grande profondeur aurait entraîné soit la confection d'une boule plus petite (c'est-à-dire une précision plus faible), soit l'emploi d'un cylindre nettement plus haut. La seconde éventualité aurait provoqué beaucoup d'inconvénients, parmi lesquels nous citons : un plus grand volume de suspension, c'est-à-dire une plus forte consommation d'eau distillée; des dépenses supérieures pour verrerie avec accroissement des risques de casse; une maniabilité nettement diminuée de l'hydromètre lui-même, etc.

A notre avis, l'erreur commise pour une valeur $B = 1$ ne peut influencer le résultat que d'une façon minime, presque négligeable.

3. Une constante, représentée par la lettre N , qui varie avec l'espèce de sol et dont la valeur oscille entre 0 et -2 pour les sols normaux.

4. La forme de la boule de l'hydromètre; dans le tableau I, C signifie une forme cylindrique, D.C. signifie une forme doucement conique. La forme de la boule de l'hydromètre construit par nous est intermédiaire entre ces deux extrêmes et nous paraît être la plus pratique. Théoriquement une forme

doublement conique donnerait une erreur inférieure; mais un tel corps d'immersion deviendrait trop grand si l'on veut obtenir un volume de 100 ml. Nous avons alors choisi un corps d'immersion d'aspect cylindrique, mais ayant des extrémités coniques. L'erreur obtenue sera ainsi intermédiaire entre les valeurs données par le tableau.

Un examen du tableau permet finalement d'observer que l'erreur est toujours positive et que la valeur de cette erreur pour notre hydromètre variera entre 0,3 à 1 % ($R = 1/3$; $B = 1$; forme intermédiaire entre cylindre et doublement conique; N variable entre 0 et -2). Une telle erreur peut être négligée, étant donnée l'importance des autres sources d'erreurs, ce qui nous permet d'admettre que la profondeur de détermination correspond avec le centre du corps d'immersion de l'hydromètre.

2. Densité du sol.

Pour calculer le temps de sédimentation, en partant de la loi de Stokes, et pour déduire la concentration de la suspension, nous avons admis comme densité du sol la valeur 2,675. Cette valeur est la moyenne que nous avons trouvée pour un grand nombre de déterminations effectuées sur la fraction argileuse de 0 à 2 microns.

Une même valeur moyenne a été trouvée par Hooghoudt ⁽⁵⁾ pour des sols hollandais.

Si la valeur réelle de la densité s'écarte de la moyenne admise, on commet à la fois une erreur lors du calcul du temps de sédimentation et une erreur lors du calcul de la quantité de particules en suspension.

a) Influence de la densité du sol sur la loi de Stokes.

La loi de Stokes signale que

$$V = 2/9 \frac{D_s - D_e}{\eta} \cdot g \cdot r^2,$$

dans laquelle

V = vitesse de chute en centimètres par seconde;

T = temps de sédimentation en secondes;

⁽⁵⁾ S. B. HOOGHOUT, *Gecombineerde zeef- en pipetmethode...*, n° 50 (13) A, 1945 (Rijkslandbouwkundig proefstation Groningen).

Ds = densité du sol;

De = densité du milieu de sédimentation (eau);

g = accélération du champ de gravité;

r = rayon des particules en suspension;

η = viscosité du milieu de sédimentation (eau).

D'autre part, nous savons que

$$V = \frac{\text{profondeur de détermination à l'hydromètre}}{T}$$

La profondeur de la détermination à l'hydromètre est déterminée avec la formule signalée antérieurement. Le calcul du temps de sédimentation pour une fraction granulométrique donnée se fait alors en admettant que Ds est égal à 2,675.

Tout écart de la densité réelle aura une répercussion sur le diamètre des particules lorsque la mesure se fait pour le temps T, admis dans la formule. Le tableau suivant donne les écarts de diamètre pour les limites granulométriques de 2, 10 et 20 μ et pour différentes densités comprises entre 2 et 3,2.

TABLEAU II.

Variations des erreurs pour différentes densités de sol.

Ds	Valeur du diamètre			Erreur % sur le diamètre	Erreur % lors du calcul de la concentration
2	2,56	12,94	25,60	+29	-20,15
2,1	2,44	12,34	24,36	+23	-16,35
2,2	2,36	11,80	23,62	+18	-12,89
2,3	2,27	11,34	22,70	+13	- 9,73
2,4	2,19	10,92	21,86	+ 9	- 6,84
2,5	2,11	10,56	21,13	+ 5,5	- 4,18
2,6	2,05	10,22	20,46	+ 2,2	- 1,72
2,675	2 μ	10 μ	20 μ	—	—
2,7	1,984	9,92	10,84	- 0,8	+ 0,55
2,8	1,93	9,62	10,28	- 3,8	+ 2,67
2,9	1,90	9,38	18,98	- 6,2	+ 4,63
3,0	1,83	9,14	18,30	- 8,6	+ 6,47
3,1	1,79	8,92	17,86	-11,0	+ 8,18
3,2	1,74	8,72	17,44	-13,0	+ 9,79

L'importance de l'erreur, cependant, ne peut être déduite que pour autant qu'on connaisse l'inclinaison de la courbe cumulative. Supposons une courbe qui présente un gradient de 1,5, au diamètre de 10 μ , et soit la densité réelle des particules en suspension = 2,1; les particules déterminées auront alors en réalité un diamètre de 12,34 μ au lieu de 10; l'erreur commise s'élève ainsi à $1,5 \times (12,34 - 10)$ ou 3,5 % sur la fraction 0-10 μ .

b) *Influence de la densité du sol sur la densité de la suspension.*

La formule donnée au § 2 donne la quantité de sol en suspension par litre, dans la supposition que la valeur exacte de la densité du sol sec soit connue.

Si cette dernière est différente de la valeur admise 2,675, la quantité calculée du sol en suspension sera entachée d'erreur; dans ce cas l'erreur sera du second type et s'élève à

$$er \% = \frac{Ds - 2,675}{1,675 Ds} \times 100.$$

Cette erreur se retrouve dans le tableau précédent pour toutes les densités possibles entre 2 et 3,2. Le tableau nous apprend qu'on trouvera trop peu lorsque la valeur Ds est inférieure à 2,675 et vice versa. Le signe de cette erreur est l'inverse de celui provoqué par une variation de la densité de sol sur la loi de Stokes.

c) *Résultante des deux erreurs précitées.*

L'erreur qui résulte d'un écart de la densité de sol vis-à-vis de la valeur admise 2,675 étant de signes contraires pour les deux types d'erreurs signalés précédemment, l'erreur résultante dépendra de la valeur de chacune des deux erreurs; celles-ci ont été calculées pour un grand nombre de sols de composition différente.

Dans le tableau III nous nous limitons aux 5 types de sols qui se retrouvent couramment dans notre pays. Les exemples 1 et 2 se rapportent à des sols limoneux; l'exemple 3 représente un sol argileux lourd; l'exemple 4 un sol argileux léger et l'exemple 5 un sol sablonneux. A l'aide de la courbe cumulative nous avons d'abord calculé le gradient pour les limites granulométriques de 2, 10 et 20 μ , d'où nous avons déduit l'erreur propre à toute méthode de la pipette; ensuite nous

avons calculé l'erreur sur la densité de la suspension provenant d'une variation de la densité du sol; la somme des deux nous donne l'erreur résultante.

Nous y ajoutons une représentation graphique (fig. 6 et 7) donnant la courbe cumulative avec les erreurs maxima et minima (correspondant aux densités de sols de 2 à 3,2) propres à la pipette et à l'hydromètre.

Conclusions de l'étude des erreurs.

1. L'erreur propre à la pipette représente une allure régulière : elle est la plus petite pour la fraction argileuse et augmente graduellement pour les fractions limoneuses et sableuses.

2. L'erreur finale avec l'hydromètre présente une allure moins régulière : pour les deux sols limoneux, les deux sources d'erreurs à signes opposés se neutralisent pour une valeur granulométrique déterminée. On peut admettre cependant, et ceci en opposition avec ce que l'on constate pour la pipette, que l'erreur relativement la plus importante est commise pour les dimensions granulométriques les plus petites.

3. On a constaté que la densité de la fraction argileuse présente des variations nettement inférieures à celles constatées pour les fractions limoneuses. Dans la pratique courante des analyses en séries cela signifie que les erreurs propres à la pipette sont les plus importantes pour la fraction qui présente la plus grande variabilité. On peut en déduire un avantage de la méthode à l'hydromètre.

4. Pour les sols argileux lourds, l'erreur commise avec l'hydromètre sera théoriquement supérieure à celle commise avec la pipette.

5. Pour les sols argileux légers, l'erreur obtenue avec l'hydromètre est la plus importante pour un faible diamètre des particules, alors que le phénomène inverse se constate pour la pipette.

6. Dans le cas des sols limoneux, les erreurs avec l'hydromètre sont nettement inférieures à celles obtenues avec la pipette.

7. Pour les sols sablonneux, les meilleurs résultats s'obtiennent à fortiori avec l'hydromètre.

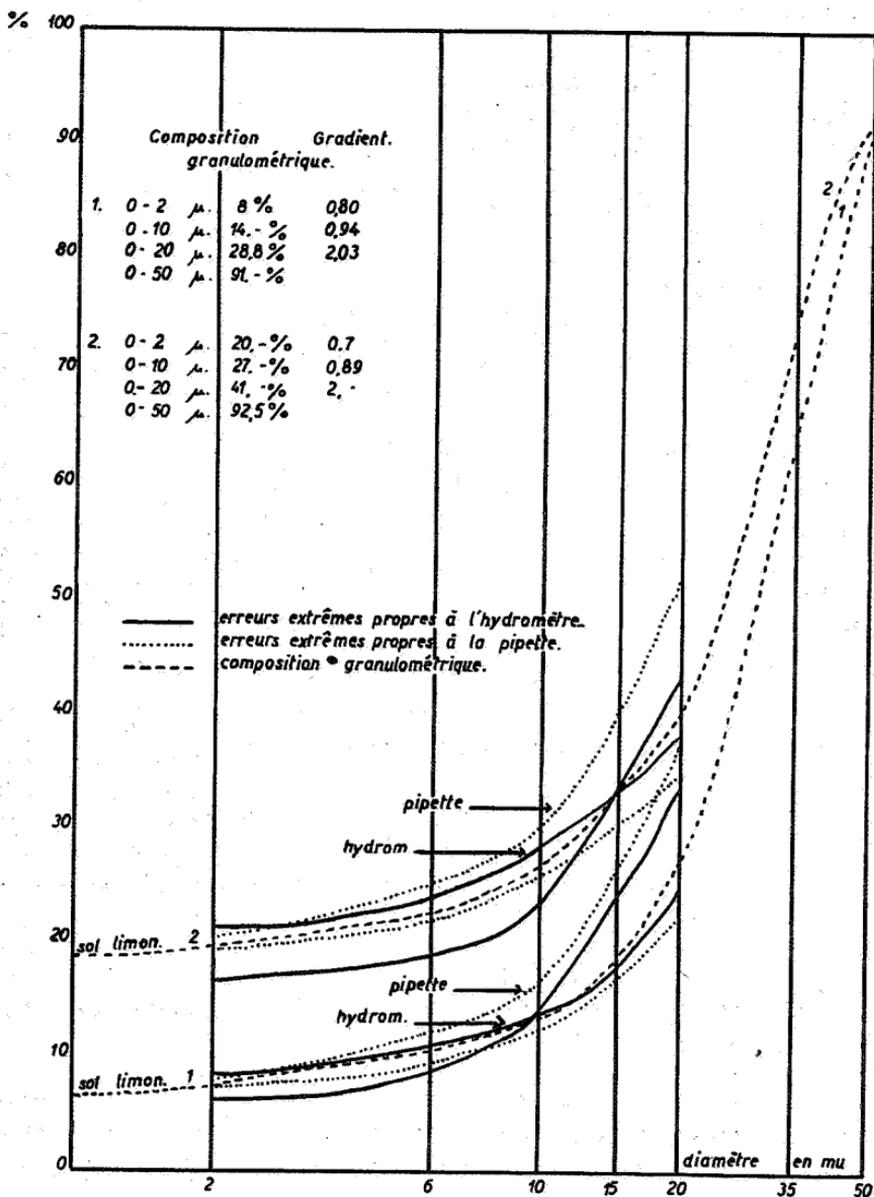


FIG. 6. — Les erreurs extrêmes propres à la technique de l'hydromètre et à celle de la pipette pour deux sols limoneux.

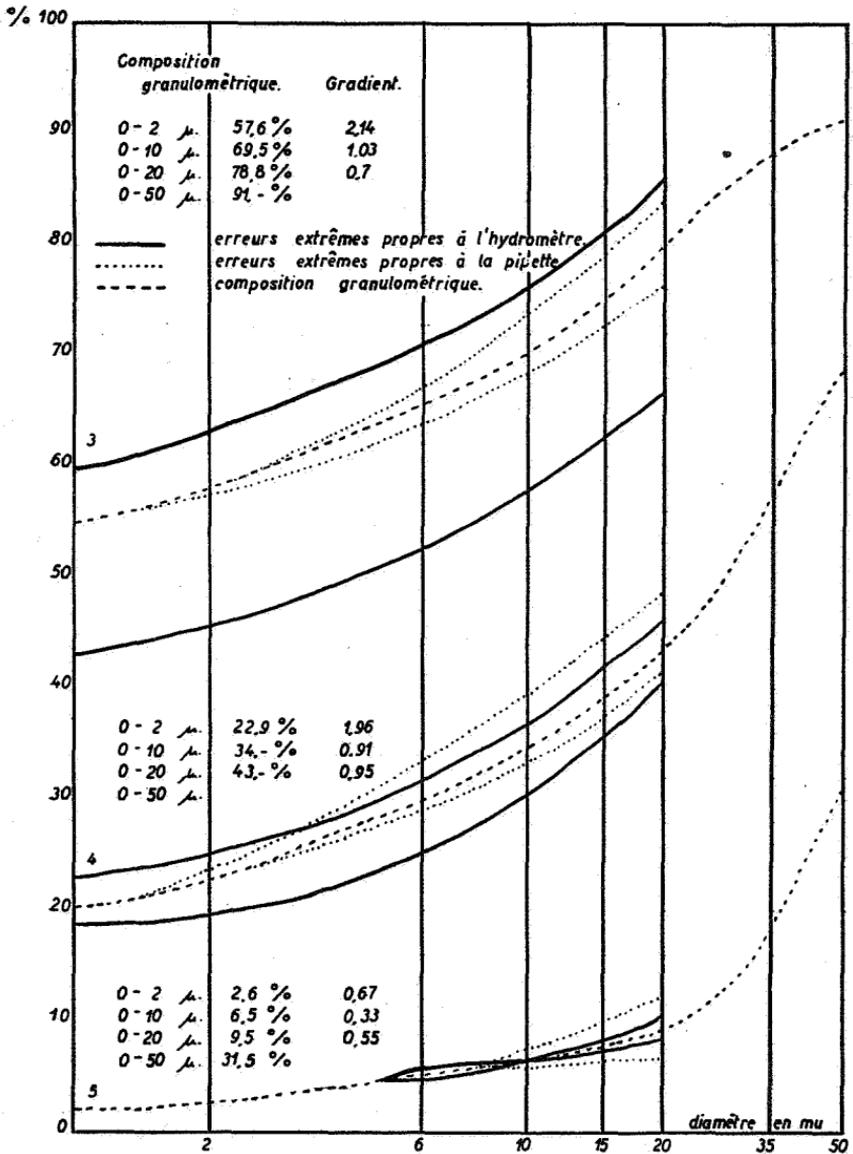


FIG. 7. — Les erreurs extrêmes propres à la technique de l'hydromètre et à celle de la pipette pour un sol argileux lourd (n° 3), un sol argileux léger (n° 4) et un sol sableux (n° 5).

TABLEAU III. — Variations de l'erreur finale, c, obtenue avec l'hydromètre, et de ses deux composantes, a et b.

Densité du sol	Fraction	Sol 1			Sol 2			Sol 3			Sol 4			Sol 5		
		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
2,0	2 μ	0,4	-1,6	-1,2	0,7	-4,0	-3,3	1,2	-11,6	-10,4	1,1	-4,6	-3,5	0,4	-0,5	-0,1
	10 μ	2,8	-2,8	—	2,6	-5,4	-2,8	3,0	-14,0	-11,0	2,7	-6,9	-4,2	1,0	-1,3	-0,3
	20 μ	11,4	-5,7	6,7	11,2	-8,3	2,9	3,9	-15,9	-12,0	5,3	-8,7	-3,5	3,1	-1,9	1,2
2,1	2 μ	0,4	-1,3	-0,9	0,5	-3,3	-2,8	0,9	-9,4	-8,5	0,9	-3,7	-2,8	0,3	-0,4	-0,1
	10 μ	2,2	-2,3	-0,1	2,1	-4,4	-2,3	2,4	-11,4	-9,0	2,1	-5,6	-3,5	0,8	-1,1	-0,3
	20 μ	8,9	-4,7	5,2	8,7	-6,7	2,0	3,1	-12,9	-9,8	4,1	-7,0	-2,9	2,4	-1,6	0,8
2,2	2 μ	0,3	-1,0	-0,7	0,4	-2,6	-2,2	0,8	-7,4	-6,6	0,7	-3,0	-2,3	0,2	-0,3	-0,1
	10 μ	1,7	-1,8	-0,1	1,6	-3,5	-1,9	1,9	-9,0	-7,1	1,6	-4,4	-2,8	0,6	-0,8	-0,2
	20 μ	7,3	-3,7	3,6	7,2	-5,3	1,9	2,5	-10,2	-7,7	3,4	-5,5	-2,1	2,0	-1,2	0,8
2,3	2 μ	0,2	-0,8	-0,6	0,3	-1,9	-1,6	0,6	-5,6	-5,1	0,5	-2,2	-1,7	0,2	-0,3	-0,1
	10 μ	1,3	-1,4	-0,1	1,2	-2,6	-1,4	1,4	-6,8	-5,4	1,2	-3,3	-2,1	0,4	-0,6	-0,2
	20 μ	5,5	-2,8	2,7	5,4	-4,0	1,4	1,9	-7,7	-5,8	2,6	-4,2	-1,6	1,5	-0,9	0,6
2,4	2 μ	0,2	-0,6	-0,4	0,2	-1,4	-1,2	0,4	-4,0	-3,6	0,4	-1,6	-1,2	0,1	-0,2	-0,1
	10 μ	0,9	-1,0	-0,1	0,8	-1,8	-1,0	0,9	-4,8	-3,9	0,8	-2,4	-1,6	0,3	-0,5	-0,2
	20 μ	3,8	-1,9	1,9	3,7	-2,8	0,9	1,3	-5,4	-4,1	1,8	-3,0	-1,2	0,1	-0,7	0,3
2,5	2 μ	0,1	-0,3	-0,2	0,1	-0,8	-0,7	0,2	-2,4	-2,2	0,2	-1,0	-0,8	0,1	-0,1	—
	10 μ	0,5	-0,6	-0,1	0,5	-1,1	-0,6	0,6	-2,9	-2,3	0,5	-1,4	-0,9	0,2	-0,3	-0,6
	20 μ	2,3	-1,2	1,1	2,3	-1,7	0,6	0,8	-3,3	-2,5	1,1	-1,8	-0,7	0,6	-0,4	0,2
2,6	2 μ	—	-0,1	-0,1	0,1	-0,3	-0,2	0,1	-1,0	-0,9	0,1	-3,9	-3,8	—	—	—
	10 μ	0,2	-0,2	—	0,2	-0,5	-0,3	0,2	-1,2	-1,0	0,2	-0,6	-0,4	0,1	-0,1	—
	20 μ	0,9	-0,5	0,4	0,9	-0,7	0,2	0,3	-1,4	-1,1	0,4	-0,7	-0,3	0,3	-0,2	0,1

2,7	2 μ	-	-	-	0,1	0,1	0,3	0,3	-	0,1	-	-	-
	10 μ	-0,1	0,1	-0,1	0,1	0,4	0,3	-0,1	-0,1	0,2	-	-	-
	20 μ	-0,3	0,2	-0,3	0,2	0,4	0,3	-0,2	-0,2	0,2	-	-0,1	-
2,8	2 μ	-0,1	0,2	0,1	0,5	0,4	1,5	1,4	-0,1	0,6	-	0,1	0,1
	10 μ	-0,4	0,4	-0,3	0,7	0,4	1,9	1,5	-0,3	0,9	0,6	-0,1	0,2
	20 μ	-1,5	0,8	-0,7	1,1	-0,3	2,1	1,6	-0,7	1,1	0,4	-0,4	0,3
2,9	2 μ	-0,1	0,4	0,3	0,9	0,8	2,7	2,5	-0,2	1,1	0,9	-0,1	0,1
	10 μ	-0,6	0,6	-	1,3	0,7	3,2	2,6	-0,6	1,6	1,0	-0,2	0,3
	20 μ	-2,1	1,3	0,8	1,9	-0,1	3,6	2,9	-1,0	2,0	1,0	-0,6	0,4
3,0	2 μ	-0,1	0,5	0,4	1,3	1,1	3,7	3,3	-0,3	1,5	1,2	-0,1	0,2
	10 μ	-0,8	0,9	0,1	1,7	0,9	4,5	3,6	-0,8	2,2	1,4	-0,3	0,4
	20 μ	-3,5	1,8	-1,7	2,7	-0,7	5,1	3,9	-1,6	2,8	1,2	-0,9	0,6
3,1	2 μ	-0,2	0,7	0,5	1,6	1,3	4,7	4,3	-0,4	1,9	1,5	-0,1	0,2
	10 μ	-1,0	1,1	0,1	2,2	1,2	5,7	4,6	-1,0	2,8	1,8	-0,4	0,5
	20 μ	-4,3	2,3	-2,0	3,4	-0,9	6,4	4,9	-2,0	3,5	1,5	-1,2	0,8
3,2	2 μ	-0,2	0,8	0,6	2,0	1,7	5,6	5,0	-0,5	2,2	1,7	-0,2	0,3
	10 μ	-1,2	1,4	0,2	2,6	1,5	6,8	5,5	-1,2	3,3	2,1	-0,4	0,6
	20 μ	-5,2	2,8	-2,4	4,0	-1,1	7,7	5,9	-2,4	4,2	1,8	-1,4	0,9

a = erreur provenant du diamètre inexact des grains; b = erreur sur la densité de la suspension; c = erreur résultante avec l'hydromètre = $a + b$.

8. Un examen des variations de la densité des sols a montré que ces variations s'écartent faiblement de la valeur admise 2,675 lorsque la matière organique a été bien détruite. La destruction de cette matière organique est donc une manipulation qui doit être effectuée avec le plus grand soin.

IV. — COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS AVEC LA PIPETTE ET AVEC L'HYDROMÈTRE.

Dans le tableau IV nous avons réuni des déterminations comparatives, effectuées dans un même cylindre de sédimentation pour chaque échantillon examiné, en vue de réduire au minimum les autres sources d'erreurs. Toutes les mesures ont été effectuées en double. Le nombre d'échantillons étudiés de cette façon s'élève à 100, mais nous nous limitons dans ce tableau à une vingtaine d'échantillons dont les résultats sont cités à titre d'exemple.

Les écarts moyens, calculés pour les différentes fractions granulométriques, ont été obtenus avec les données obtenues avec la centaine d'échantillons.

RÉSULTATS DE CETTE ÉTUDE COMPARATIVE.

1. Reproductibilité.

a) Avec la méthode de la pipette.

Les écarts entre les déterminations effectuées en double s'élèvent en moyenne :

Pour la fraction 0-2 μ	1,4 %
Pour la fraction 2-10 μ	2,4 %
Pour la fraction 10-20 μ	2,6 %
Pour la fraction 20-50 μ	3,0 %

b) Avec l'hydromètre.

Les écarts moyens sont :

Pour la fraction 0-2 μ	0,3 %
Pour la fraction 2-10 μ	0,3 %
Pour la fraction 10-20 μ	0,5 %
Pour la fraction 20-50 μ	0,4 %

Nous pouvons en déduire que la reproductibilité obtenue avec la méthode de l'hydromètre est pratiquement 5 fois supérieure à celle obtenue avec la méthode à la pipette.

2. Exactitude de la méthode à l'hydromètre.

Étant donnés les écarts parfois importants pour les déterminations doubles faites avec la pipette, il est difficile de faire une étude comparative, échantillon par échantillon; ce n'est qu'avec un grand nombre de comparaisons qu'on peut supposer que les écarts excessifs se neutralisent.

TABLEAU IV.

Comparaison de quelques résultats obtenus avec la pipette et avec l'hydromètre.

N° échantillon	0 - 2 μ		2 - 10 μ		10 - 20 μ		20 - 50 μ	
	Pipette	Hydrom.	Pipette	Hydrom.	Pipette	Hydrom.	Pipette	Hydrom.
Planchette 11 W								
19 A	17,9	17,3	12,5	8,8	8,2	11,3	33,1	37,5
	17,7	16,8	8,5	9,3	11,0	10,5	37,7	38,3
19 B	34,8	28,8	6,4	10,7	7,8	10,1	31,6	32,0
	27,9	29,2	8,1	9,5	8,0	9,8	39,2	33,1
19 D	41,9	32,1	4,5	7,4	5,3	7,3	13,9	27,6
	34,0	32,7	6,0	7,1	5,1	6,9	29,5	27,7
19 E	28,8	23,5	1,7	6,2	6,4	4,7	21,8	25,2
	23,3	24,3	5,7	5,4	5,8	4,6	29,2	25,3
19 F	14,4	13,7	1,5	2,1	3,2	1,7	18,3	15,5
	13,3	13	2,9	2,9	4,3	2,3	12	14,8
Planchette 56 W								
5/1	2,0	1,1	0,5	1,4	1,1	0,4	4,7	4,8
	2,3	1,1	1,4	1,6	1,8	0,4	4,1	4,6
5/2	1,9	1,6	0,3	0,9	0,7	0,5	4,1	4,1
	2,6	1,7	0,6	1,3	2,3	0	4,3	4,2
5/3	1,2	1,3	0,8	1,8	1,2	1,1	2,9	3,2
	2,6	1,4	1,3	1,3	3,8	1,7	0,9	3,1
5/4	2,2	1,3	0,7	1,7	1,9	0,4	4,7	4,0
	2,9	1,4	2,1	1,3	2,6	0,8	2,3	3,9
5/5	1,3	1,2	0,9	2,6	1,1	0,3	3,4	3,2
	2,3	0,9	2,2	2,6	1,2	0	5,8	3,8
5/6	2,8	2,5	0,9	1,3	2,5	1,1	1,7	5,1
	3,3	2,6	2,4	1,2	0,1	2,6	4,2	4,6
Sol limoneux								
13.129	24,4	24,2	10,3	12,1	13,8	13,6	47,5	46,1
	25,6	24,4	12,1	11,3	14,6	16,5	43,5	43,8

TABLEAU IV (suite).

N° échantillon	0 - 2 μ		2 - 10 μ		10 - 20 μ		20 - 50 μ	
	Pipette	Hydrom.	Pipette	Hydrom.	Pipette	Hydrom.	Pipette	Hydrom.
13.158	17,4	18,5	9,8	9,8	14,8	14,6	52,7	52,2
	16,9	18,4	10,2	9,2	16,9	16,4	50,0	50,7
13.167	19,0	18,9	7,1	8,7	13,8	13,7	55,3	53,8
	18,1	18,9	5,0	8,5	18,4	15,0	58,1	52,7
13.180	22,4	21,0	9,0	9,0	15,8	16,5	49,4	50,3
	20,0	20,0	13,2	10,6	16,9	14,8	46,7	51,4
Planchette 72 E								
24/4	17,0	17,3	7,3	4,4	7,2	8,6	63,5	65,2
	16,7	18,0	5,2	3,2	5,4	8,7	68,0	65,4
24/5	13,0	15,3	9,4	4,7	8,9	10,6	64,9	65,7
	17,2	16,2	1,4	3,9	10,3	10,5	67,3	65,7
33/1	15,6	9,5	4,0	5,3	10,4	12,4	66,0	65,6
	10,5	9,6	7,0	5,6	9,9	12,4	66,0	65,6
33/2	10,9	10,5	5,1	6,0	12,7	12,7	65,0	64,4
	9,2	10,2	8,0	6,5	10,5	12,3	66,1	64,4
33/3	13,3	11,3	5,4	6,1	11,5	12,5	64,5	64,6
	9,5	11,1	8,4	6,5	12,5	12,7	64,3	64,2

Les écarts moyens entre la technique à la pipette et la technique à l'hydromètre, et calculés pour les 100 échantillons étudiés, sont les suivants :

Pour la fraction 0-2 μ	+0,05
Pour la fraction 2-10 μ	-0,14
Pour la fraction 10-20 μ	+0,23
Pour la fraction 20-50 μ	-0,17

Nous nommons l'écart positif lorsque le résultat obtenu avec l'hydromètre est supérieur à celui obtenu avec la pipette. Les écarts entre les deux techniques sont très petits, comme le prouvent ces chiffres; ce fait nous permet d'admettre que les résultats obtenus avec l'hydromètre, étant donnée simultanément une très grande reproductibilité, peuvent être considérés comme exacts.

Si nous examinons les duplos obtenus avec la méthode de la pipette nous observons que les écarts pour un même échantillon sont parfois très considérables; avec les 100 échantillons étudiés, nous avons trouvé pour plus de 50 % des échantillons un écart sur une des fractions granulométriques dépassant 3 %. Dans ce cas une des deux déterminations est erronée, ce qui revient à dire qu'il faut recommencer l'analyse pour au moins 25 % du nombre des échantillons. Ceci ne se constate pas pour la technique à l'hydromètre.

Au cours des deux dernières années nous avons effectué avec la méthode de la pipette environ 10.000 analyses granulométriques.

Un système graphique de contrôle, permettant une confrontation aisée vis-à-vis de la composition granulométrique d'un prototype appartenant au même type de sol que l'échantillon étudié, nous permettait d'indiquer les échantillons dont l'analyse était à recommencer.

Nous avons constaté que des 10.000 analyses effectuées, environ 20 % étaient à recommencer. Ce pourcentage correspond bien avec celui déduit de l'étude précédente des erreurs propres à la méthode à la pipette. La technique avec l'hydromètre à chaîne se révèle ainsi être une acquisition de très grande importance pour les déterminations granulométriques en série, comme c'est le cas avec les travaux de la carte pédologique de Belgique.

V. — MODUS OPERANDI DE L'ANALYSE MÉCANIQUE.

Ci-après nous signalons le *modus operandi* suivi par nous :

Peser 20 g de sol sec, après tamisage sur tamis de 2 mm; la pesée se fait avec une exactitude de 0,1 g.

Ajouter 100 ml H_2O_2 , 30 %, avec quelques gouttes d'acide acétique; laisser réagir toute une nuit, puis porter à ébullition; éventuellement une seconde attaque avec H_2O_2 .

Ajouter 100 ml HCl, 0,2 n, et ajouter pour chaque unité % présente de $CaCO_3$ un supplément de 0,33 ml HCl concentré (12 n), puis faire bouillir 15 minutes (bien agiter).

Suivant la teneur en $CaCO_3$ on décantera de 3 à 5 fois avec de l'eau distillée.

Tamisage sous eau sur tamis de 50 μ .

La fraction inférieure à 50 μ est transvasée dans un cylindre de sédimentation; on y ajoute 50 ml d'un liquide de peptisation (contenant 13,399 g d'oxalate de sodium et 2,12 g de carbonate de sodium par litre) et le tout est porté au volume total d'un litre.

On détermine à l'hydromètre les fractions de 0-2, 0-10, 0-20 μ .

La profondeur de détermination est choisie de telle façon que le temps de sédimentation pour la fraction 0-2 μ s'élève à 15 heures. Ceci permet une agitation à 17 h 30 le soir et une détermination le lendemain matin à 8 h 30.

On a avantage à déterminer d'abord la fraction 0-2 μ et ensuite les fractions 0-10 et 0-20 μ . En effet, dans ce cas on aura tout le temps pour choisir les petits poids supplémentaires (les cavaliers), qui seront connus lorsqu'il s'agira de travailler plus vite pour les fractions 0-10 et 0-20 μ .

Toutes les fractions déterminées sont totalisées et majorées de la teneur en matière organique, en CaCO_3 et en humidité. La différence de ce total avec 20 g donne la fraction 20 à 50 μ .

L'établissement, une fois pour toutes, de nombreux tableaux permettra de déterminer le pourcentage des différentes fractions sans calcul.

Les courbes cumulatives dessinées avec ces données permettent la correction graphique dans le cas où le tamis employé était de 105, respectivement 210, au lieu de 100 et 200 μ . Cette courbe permet aussi la lecture du chiffre médian.

CONCLUSION GÉNÉRALE.

1. La méthode de l'hydromètre à chaîne donne des résultats exacts et d'une reproductibilité pratiquement parfaite, ce qui élimine la détermination en double.

2. La technique est extrêmement économique, du fait que l'emploi des balances analytiques est réduit au minimum et que l'emploi de récipients à dessiccation, de bains-marie et d'étuves est devenu superflu.

3. Le rendement augmente de plus de 40 %, comme nous avons pu l'établir définitivement au cours de nombreux tests chronométrés.

**Contribution à l'étude
de la radioactivité des argiles belges (*),**

par I. DE MAGNÉE.

Depuis 1948, le Laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université Libre de Bruxelles a entrepris l'étude de la radioactivité des roches sédimentaires de la Belgique.

L'intérêt d'une telle étude ressort de diverses constatations qui ont été faites à l'étranger. Déjà d'intéressantes conclusions d'ordre géologique se dégagent de ces études. Nous renvoyons le lecteur aux excellents mémoires publiés par les géologues attachés au Geological Survey et à l'Atomic Energy Commission des États-Unis (1), ainsi que par C. F. Davidson, de l'Atomic Energy Division, Geological Survey of Great Britain.

Rappelons d'abord l'importance croissante de la *Géochimie*. Cette science s'attache tout spécialement à l'étude de la répartition d'éléments relativement rares dans les minéraux et les roches. Ces recherches de nature statistique sont généralement laborieuses, à moins qu'on ne dispose de méthodes de dosage de « traces » qui soient particulièrement aisées et rapides. Grâce aux appareils modernes destinés à la mesure de la radioactivité, il est particulièrement facile de doser des traces minimales de métaux radioactifs, en ordre principal l'*uranium* et le *thorium*.

La teneur des roches communes en uranium et thorium est certainement liée à leur origine. Il est évident à priori que dans une série sédimentaire cette teneur variera d'une couche à l'autre, mais gardera une certaine constance latérale dans un banc déterminé.

Dès lors, la radioactivité d'un sédiment acquiert une valeur stratigraphique locale, au même titre que d'autres paramètres lithologiques et géochimiques.

(*) Manuscrit remis au Secrétariat le 17 juin 1951.

(1) V. E. MCKELVEY and J. M. NELSON, Characteristics of marine uranium-bearing sedimentary rocks (*Economic Geology*, Vol. 45, n° 1, 1950, pp. 35-69). — C. F. DAVIDSON, The Distribution of Radioactivity (*Mining Magazine*, Vol. 85, n° 6, 1951, pp. 329-340).

Cette conclusion à priori a été abondamment prouvée dans les séries pétrolifères, grâce à la technique du « carottage par rayons gamma ». Depuis plus de quinze ans, de nombreux sondages sont explorés de la sorte, en vue d'obtenir directement des graphiques donnant les radioactivités relatives en regard de la profondeur. La pratique a démontré que ces diagrammes avaient une valeur analogue à celle des « carottages électriques Schlumberger » et permettaient des corrélations stratigraphiques détaillées de sondages voisins. Ils donnent en outre des indications sur la nature lithologique des roches traversées.

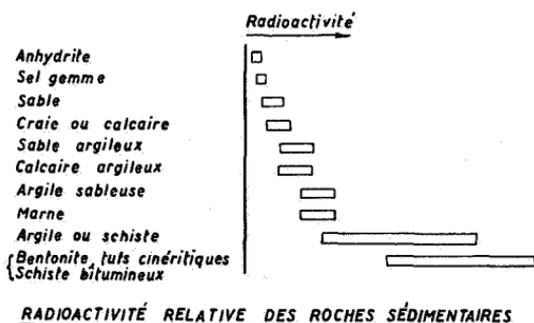


FIG. 1.

Outre la corrélation stratigraphique à courte distance, la radioactivité pourrait bien acquérir un intérêt moins local. Les sédiments marins argileux de certaines époques géologiques semblent en effet caractérisés par une teneur en uranium anormalement élevée. (Tremadoc, Houiller inférieur).

De bonnes indications existent en faveur de la thèse que la teneur en uranium est d'autant plus forte que l'accumulation du sédiment argileux a été lente [cf. (1)]. Les roches sédimentaires les plus radioactives sont les *schistes noirs* marins (graphiteux ou bitumineux) et les *phosphates de chaux* d'origine marine. La teneur en oxyde d'uranium de ces roches atteint assez souvent 0,01 à 0,02 %. Par contre, les calcaires, sables et quartzites purs, ainsi que les houilles, sont pratiquement exempts d'uranium. Les autres roches prennent des positions intermédiaires, leur radioactivité augmentant grosso-modo avec leur teneur en constituants argileux.

Nous empruntons à un ouvrage récent ⁽²⁾ le graphique figure 1, qui résume qualitativement l'expérience acquise aux États-Unis par l'utilisation du carottage par rayons gamma.

On ne peut évidemment se faire une idée quantitative de la radioactivité des sédiments que par des mesures faites *au laboratoire*, sur des échantillons homogènes. De nombreux chercheurs ont entrepris cette tâche, mais les résultats publiés sont encore assez fragmentaires et ne permettent pas de généralisations au sujet du rôle géochimique joué par l'uranium et le thorium.

Nous avons voulu apporter une contribution à cette question en étudiant la radioactivité d'une série d'argiles belges, tant continentales que marines, pour lesquelles nous disposons de bonnes analyses chimiques et de données granulométriques.

TECHNIQUE DES MESURES.

Rappelons que, jusqu'à présent, on a le plus souvent mesuré le rayonnement α . La mesure s'effectue soit par chambres d'ionisation, soit par la méthode photographique. Cependant, les chercheurs ont également utilisé le compteur de Geiger-Müller, qui se prête à la mesure du rayonnement γ ou du rayonnement $\beta + \gamma$.

Nos recherches sont basées sur la mesure du rayonnement γ , à l'aide de grands tubes G. M. à cathode de cuivre, réalisés par Max Cosyns. La technique employée est voisine de celle décrite par B. Pontecorvo ⁽³⁾.

L'échantillon, séché et broyé, est placé dans un container en « plexiglass » ayant la forme d'un cylindre creux, à section annulaire. Le tube G. M. est placé suivant l'axe du container, de façon que sa partie active soit complètement entourée par l'échantillon. Le tout est glissé dans un cylindre de plomb dont la paroi a 5 cm d'épaisseur. Le tube G. M. utilisé a 110 cm² de surface active.

Dans ces conditions géométriques, et dans notre laboratoire, une mesure *à vide*, sous plomb, donne un comptage moyen de

(2) LE ROY, etc., Subsurface methods of Geology (Colorado School of Mines, 1950).

(3) BRUNO PONTECORVO, Radioactivity Analyses of Oil Well Samples (*Geophysics*, Vol. 7, n° 1, 1942, p. 90).

160 impulsions par minute. Cette activité provient principalement des rayons cosmiques, mais aussi de la radioactivité propre du local où s'effectuent les mesures.

Elle constitue le « back-ground » (4), dont la valeur est à soustraire des mesures faites avec échantillon en place.

L'échantillon remplit complètement le container. Son volume correspond à un poids d'environ 1 kg. Dans ces conditions, les mesures avec échantillon en place ont donné des comptages variant de 170 à 200 impulsions par minute, soit net 10 à 40 impulsions dues à l'échantillon d'argile lui-même.

Nous avons adopté une durée de comptage d'au moins une heure, précédée et suivie d'une détermination de back-ground pendant une demi-heure. Dans le cas le plus défavorable (argiles à très faible radioactivité), l'erreur statistique probable était de

$$67,45 \frac{\sqrt{(170 + 160) 60}}{10 \times 60} = 15,85 \text{ \%}.$$

Cependant, cette précision est quelque peu illusoire, à cause de la fréquence d'erreurs accidentelles dues à la variabilité de la tension de réseau et à l'instabilité relative du système électronique. Ces erreurs ont été corrigées autant que possible par des répétitions de mesures.

Dans les conditions géométriques des mesures, l'autoabsorption de l'échantillon pulvérulent d'argile ne pouvait avoir qu'une faible influence. Une erreur systématique plus notable est due à l'inégal degré de tassement dans le container (densité apparente) d'une argile à l'autre.

Le but à atteindre était d'évaluer le rayonnement γ et d'en déduire la teneur équivalente en radium, c'est-à-dire celle qui provoquerait la même activité γ que le total des teneurs en uranium et en thorium, y compris leurs descendants supposés en équilibre (teneur équivalente en grammes de radium par gramme de roche). A supposer que le thorium soit absent, la teneur en uranium se déduit de la teneur équivalente en radium en la multipliant par le facteur $2,97.10^6$.

(4) I. DE MAGNÉE, Quelques aspects de l'emploi du compteur de Geiger-Müller en prospection minière (*Institut Royal Colonial Belge*, t. XX, 1949, fasc. 4, p. 900).

Il restait à procéder à l'étalonnage. Celui-ci a été fait par mon collaborateur J. Engelborghs. Une solution titrée de sel de radium nous a été très obligeamment fournie par le Département Radium de l'Union Minière du Haut-Katanga. Convenablement diluée, cette solution a été évaporée avec comme support une quantité de sable blanc pur remplissant exactement le container. Cette masse a sensiblement le même coefficient d'ab-

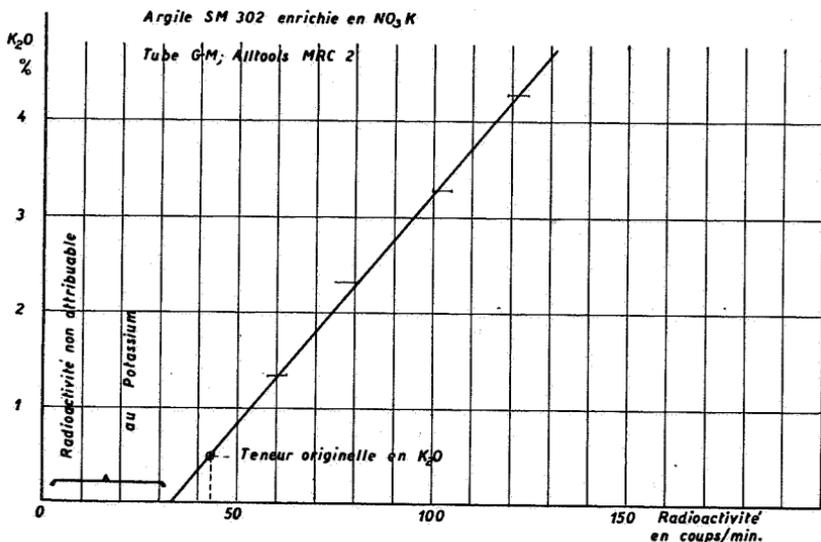


FIG. 2. — Influence du rayonnement du potassium (tube à paroi mince).

sorption pour les rayons γ que les argiles sèches. De cette façon l'effet d'absorption a pu être à peu près éliminé.

Dans ces conditions, une activité de 1 impulsion par minute correspondait à une teneur de $2,2 \cdot 10^{-13}$ g de radium par gramme de sable, le container contenant 1 kg de roche.

Dans ce qui précède nous n'avons pas tenu compte du rayonnement du potassium contenu dans les argiles ou, plus exactement, de l'activité de l'isotope K^{40} , qui représente 0,012 % de la masse du potassium naturel. Pour les argiles assez riches en potassium, il n'était pas exclu a priori que l'activité mesurée fût due en partie notable à cet élément. Il importait de déterminer son influence, car le but de l'étude était principalement d'estimer les teneurs en uranium.

Nous avons effectué un étalonnage en ajoutant des quantités croissantes de K_2O à une argile à teneur en potassium connue. Le graphique figure 2 met en évidence la loi linéaire qui lie la teneur en K_2O à la radioactivité $\beta + \gamma$ mesurée. Cette loi permet d'estimer dans le cas de l'argile SM 302, que le potassium est responsable de 22 % de l'activité observée. Mais ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un tube Alltools à parois très minces (0,1 mm) destiné à la mesure des rayons $\beta + \gamma$. Pour le tube Cosyns à paroi épaisse que nous utilisons pour les mesures γ , l'influence de 1 % de K_2O n'était pratiquement pas mesurable.

Nous n'avons donc pas cru nécessaire d'apporter une « correction pour potassium » aux résultats que nous donnons plus loin (5). Remarquons que les mesures au tube à parois minces sont rapides et précises. Elles n'exigent qu'une faible quantité de matière (10 à 20 g). En l'absence de thorium et d'uranium, elles fournissent une excellente méthode de détermination de la teneur en potassium d'une solution ou d'une matière solide.

QUELQUES RÉSULTATS.

Bien que nos études ne soient pas achevées, nous croyons utile de donner quelques résultats, résumés sous forme de graphiques (fig. 3 à fig. 5).

Nos recherches se sont étendues à des argiles et schistes d'âges divers, tant continentaux que marins. La comparaison des argiles marines avec les argiles continentales avait pour nous un intérêt particulier, parce que nous menions parallèlement une étude comparée des schistes houillers. Le but pratique de cette dernière étude était la détection des horizons marins du West-phalien, grâce à leur radioactivité plus élevée que celle des schistes continentaux encaissants.

Le « Comité belge pour l'Etude des Argiles » (COBEA) a bien voulu mettre à notre disposition environ 150 échantillons d'argiles belges dont les analyses chimique et granulométrique avaient été effectuées par ses laboratoires. Ces analyses ont été publiées dans les rapports annuels du COBEA et portent principalement sur les argiles plastiques du Condroz et de l'Entre-Sambre-et-Meuse (Oligocène-Miocène continental), sur les argi-

(5) Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur aux travaux de E. N. TIRATSOO [The Radioactivity of Sediments (*Petroleum*, 1949)].

les yprésiennes marines du Brabant et sur les argiles continentales du Wealdien de la région de Baudour.

Les études faites notamment aux Etats-Unis (1) et en Hollande (6) indiquent nettement que la teneur en uranium des argiles est liée aux minéraux argileux et à la finesse de grain de ceux-ci. La plupart des chercheurs concluent que les sels d'ura-

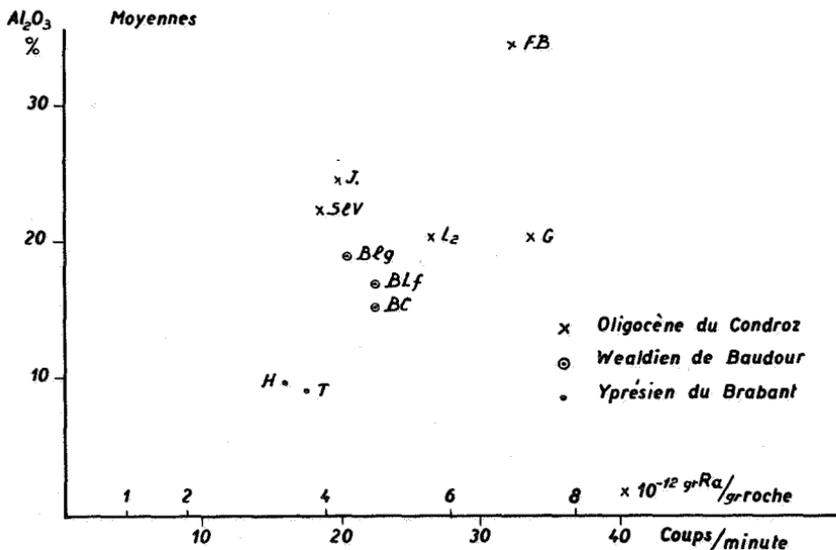


FIG. 3. — Radioactivités moyennes comparées aux teneurs moyennes en alumine.

anium ont été absorbés (à l'état de phosphates ?) à la surface des paillettes argileuses, lors du dépôt de celles-ci.

Dans ces conditions, il est intéressant de comparer la radioactivité à la teneur en Al₂O₃ des argiles, ainsi qu'à leur granulométrie.

Le diagramme figure 3 représente, en coordonnées linéaires, la relation de la radioactivité avec la teneur en alumine pour les groupes d'argiles examinés. Les points figuratifs donnent des valeurs moyennes, tant pour la teneur en Al₂O₃ que pour la radioactivité.

(6) P. J. HOOGTEIJLING, Radioactiviteit en bodemgesteldheid (Amsterdam, 1948).

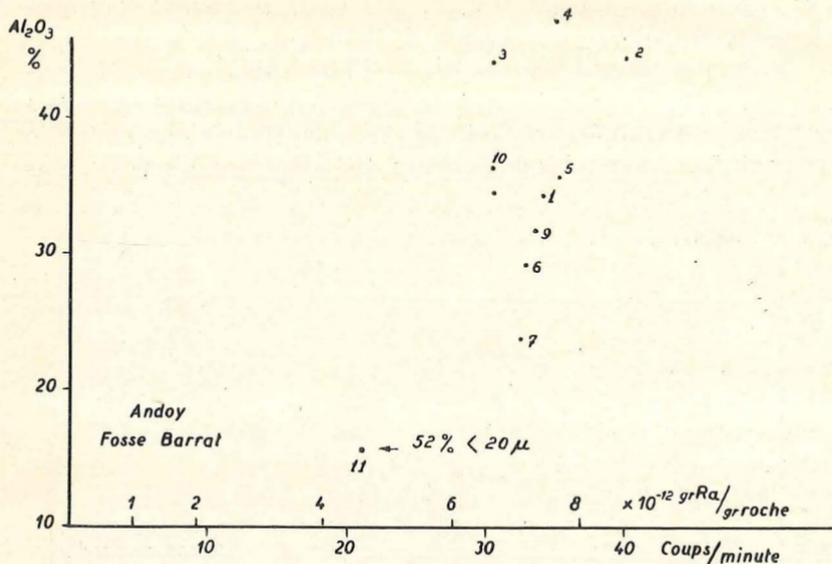


FIG. 4. — Radioactivité et teneur en alumine de onze échantillons de la terre plastique de Fosse Barrat (Andoy).

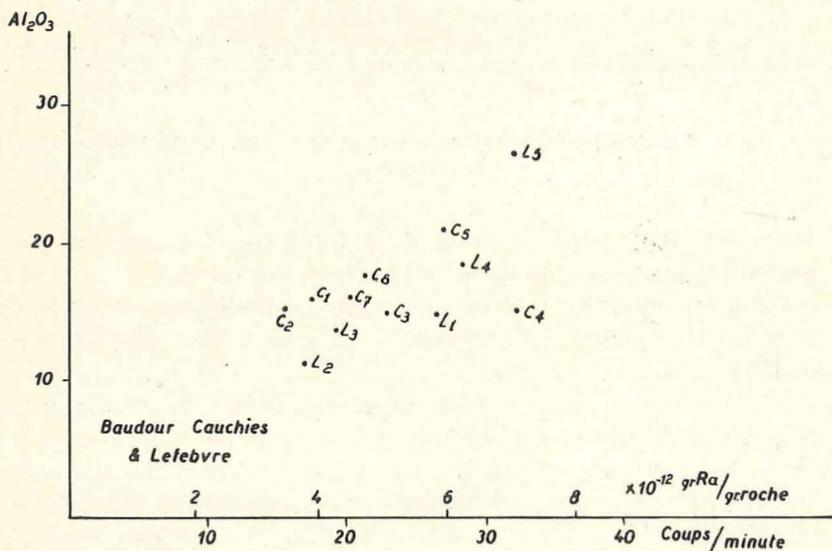


FIG. 5. — Radioactivité et teneur en alumine de douze échantillons d'argile wealdienne, provenant des exploitations Cauchies et C. Lefebvre de Baudour.

Nous indiquons ci-après la provenance des groupes d'argiles et le nombre d'échantillons faisant partie de chaque groupe :

1. Argiles oligocènes du Condroz (continentales) :

FB	Fosse Barrat, Andoy	11 éch.
SLV	Sous-la-Ville	7 éch.
L ₂	Leumont	5 éch.
G	Gérin, Onhaye	3 éch.
J	Jamiolle	2 éch.

2. Argiles wealdiennes de Baudour (continentales) :

BC	Exploitation Cauchies	7 éch.
BLf	Exploitation C. Lefebvre	5 éch.
Blg	Exploitation Legrand	2 éch.

3. Argiles yprésiennes du Brabant (marines) :

T	Tubize	8 éch.
H	Hennuyères	6 éch.

L'examen du diagramme figure 3 montre immédiatement une proportionnalité grossière entre la radioactivité et la teneur en Al_2O_3 . Mais les argiles continentales, particulièrement les terres plastiques du Condroz, accusent une forte dispersion. Celle-ci s'accroît encore lorsqu'on reporte sur le même graphique les points figuratifs de chaque argile étudiée.

C'est ce que montrent les graphiques figure 4 et figure 5, relatifs aux argiles plastiques très alumineuses d'Andoy et aux argiles plus maigres du Wealdien de Baudour.

Les premières (fig. 4) montrent une radioactivité assez constante, malgré les fortes variations de la teneur en alumine. Ni les variations de la granulométrie, ni celles de la teneur en potassium ne peuvent expliquer cette constance relative de la radioactivité. La même remarque s'applique aux gisements de terres plastiques de Sous-la-Ville, Leumont et Onhaye. Comme, d'autre part, la radioactivité moyenne varie du simple au double (voir fig. 3) pour des argiles ayant à peu près le même âge et les mêmes caractères physiques et chimiques, on doit en conclure que sont intervenues des conditions locales de dépôt. Celles-ci ne se traduisent pas nécessairement dans les analyses chimique et granulométrique.

On pourrait attribuer la constance de la teneur en U_3O_8 dans un même gisement et sa variation d'un gisement à l'autre aux

(7) L'argile n° 11 est sableuse (48 % de particules $> 20 \mu$) et très différente des autres, ce qui explique sa basse radioactivité.

différences de composition des eaux d'un lac de dépôt à l'autre. A vrai dire, une simple variation dans la vitesse d'accumulation du sédiment suffit pour faire varier la teneur en uranium, toutes autres conditions restant les mêmes. Pour les argiles marines, les études des géologues de l'U. S. Geological Survey ⁽¹⁾ ont montré que le facteur vitesse d'accumulation est prépondérant.

Pour les argiles de Baudour, moins alumineuses que celles du Condroz, la radioactivité moyenne est plus basse. Mais d'un échantillon à l'autre, pris dans un même gisement, elle varie notablement, ainsi que le montre la figure 5, pour les argiles des exploitations Cauchies (C) et Lefebvre (Lf). Cette variation montre une relation statistique assez floue avec la teneur en alumine. Il ne s'en dégage pas de conclusion nette.

Il en est de même pour les argiles marines assez sableuses de l'Yprésien. Il est vrai que leur radioactivité varie dans les limites assez étroites et n'atteint pas 5.10^{-12} g Ra/g roche.

CONCLUSIONS.

Les données qui précèdent jettent quelques lueurs sur le problème de la radioactivité des argiles. Les comparaisons avec les analyses chimique et granulométrique indiquent une proportionnalité grossière à la teneur en alumine. Mais il est manifeste que d'autres facteurs que la proportion et la finesse des minéraux argileux entrent en jeu.

Ces facteurs paraissent prépondérants dans le cas des argiles continentales.

Nous n'avons pas encore assez de données pour conclure quant aux argiles marines, pour lesquelles il faut s'attendre à une plus grande « régularité ». La vitesse de sédimentation y joue un grand rôle, de même que les conditions biologiques du milieu, comme l'ont prouvé divers chercheurs.

Nos observations ne confirment pas les conclusions de P. J. Hoogteijling, qui, pour les argiles récentes du Zuiderzee, a trouvé une proportionnalité étroite entre la radioactivité et la teneur en particules argileuses $< 16 \mu$. Comparées à la teneur en particules $< 10 \mu$ ou $< 2 \mu$, la radioactivité des argiles marines anciennes de la Belgique ne montre aucune relation bien nette et régulière. Il est vrai que les observations faites en Hol-

lande ne sont pas directement comparables aux nôtres, parce que les argiles du Zuiderzee sont trop récentes pour que soit atteint l'équilibre de l'uranium et de ses descendants.

Les radioactivités des argiles belges mesurées s'échelonnent entre 2,2 et $8,8 \times 10^{-12}$ g Ra par gramme de roche. Les mesures de W. L. Russell (8), portant sur 510 roches, montrent pour des roches argileuses américaines une gamme allant de 6 à 64×10^{-12} g Ra/g roche. Nos valeurs sont donc en moyenne nettement inférieures.

Il est curieux de remarquer que les argiles belges les plus radioactives sont des argiles continentales. Si leur radioactivité était entièrement due à l'uranium et ses dérivés en équilibre, leur teneur maximum en ce métal serait de 26 g à la tonne.

Signalons que nous avons trouvé des teneurs plus élevées dans certains schistes marins du Houiller et dans les phosphates marins du Crétacé (Ciply et Saint-Symphorien).

DISCUSSION.

M. E. Picciotto dit qu'il lui semble bien que la méthode utilisée par M. de Magnée soit plus sûre, quoique moins sensible, que celle de Sizoo et Hoogteijling, qui ont mesuré l'activité α à la chambre d'ionisation.

Des mesures non encore publiées effectuées sur des sédiments océaniques, en collaboration avec l'Institut Océanographique de Göteborg, ont montré de très fortes discordances entre l'activité α et la concentration en Ra. Ces discordances sont dues à la diffusion du Radon, dont la perte peut être totale.

Le pouvoir émanateur dépend très fortement de la dimension des grains; il est donc assez aléatoire de tirer des conclusions sur les relations entre la granulométrie et la radioactivité lorsque cette dernière est mesurée par l'activité α du sédiment meuble.

(8) W. L. RUSSELL, The total gamma-ray activity of Sedimentary Rocks, as indicated by Geiger Counter Determinations (*Geophysics*, Vol. IX, n° 2, avril 1944).

**Observations nouvelles
sur les « porphyroïdes » caradociens de la gare d'Hennuyères (*),**

par G. MORTELMANS.

I. — INTRODUCTION.

Un des traits les plus caractéristiques de la stratigraphie du socle cambro-silurien du Brabant est l'existence d'un horizon de tufs volcaniques, parfois fossilifères, interstratifié dans les schistes grauwackeux du sommet du Caradoc [Assise de Gembloux, *Sl1b* de la Carte géologique (¹)].

Cet horizon apparaît en affleurements discontinus, parfois répétés par failles, depuis la région de Rognon, à l'Ouest, jusqu'à celle de Gembloux, à l'Est.

La Carte géologique et sa légende désignent ces tufs sous le nom de « *porphyroïdes* ».

L'origine et la signification de ces roches furent longtemps discutées, et ce n'est guère qu'en 1905 que leur nature pyroclastique fut définitivement reconnue, à la suite de l'étude pétrographique très détaillée que fit E. Mathieu des affleurements de Grand-Manil [6].

Il faut reconnaître que la qualité souvent médiocre des affleurements et la grande variabilité de facies de ces roches sont loin d'en rendre l'étude aisée.

On avait depuis longtemps repéré le passage de ces tufs au Sud de la station d'Hennuyères. La Carte géologique au 40.000^e en fait apparaître une bande étroite au point précis où la ligne Bruxelles-Mons franchit le ruisseau de Coercq.

Dès 1912, P. Fourmarier avait montré que cette bande était, en fait, beaucoup plus large que ne l'indiquait la Carte et qu'on voyait « *le porphyroïde sur une longueur de 200 m au moins mesurés parallèlement à la voie ferrée* ». Il avait « *observé deux*

(*) Manuscrit remis au Secrétariat le 10 juin 1952.

(¹) La légende générale de la Carte géologique détaillée de la Belgique, publiée en 1929, adoptant provisoirement la légende proposée en 1910 par C. Malaise, place ces roches à la base du Gothlandien (Llandoverly, *Sl2a*, Assise de Grand-Manil).

passes de schiste vert compact intercalées dans la roche cristalline, mais le tout étant assez fortement altéré », il n'avait « *pu relever ni direction, ni inclinaison* » [2, p. 26].

De son côté, M. Leriche signale, en 1924, que les schistes grauwackeux fossilifères du Gouteux, au Sud de la gare d'Hennuyères, « *renferment des bancs d'un tuf volcanique, que la Carte géologique au 40.000^e désigne sous le nom de porphyroïde. Au Nord de la tranchée du Gouteux, on voit ce tuf formant plusieurs intercalations dans les schistes* ». Dans la même publication, M. Leriche admet plus ou moins explicitement l'âge caradocien de ces schistes [5, p. 48].

II. — DONNÉES NOUVELLES.

Tel était donc l'état des connaissances lorsque, en automne 1951, le Major Stevens, rentrant de Paris en train, nota au passage qu'au Sud de la gare d'Hennuyères on venait d'entailler à neuf le talus Est de la tranchée du chemin de fer.

Il signala la chose à R. Legrand, qui effectua le levé rapide de cette coupe et le déposa aux archives de la Carte (24 novembre 1951).

Connaissant l'intérêt que je porte aux manifestations magmatiques dans le socle ancien du Brabant, R. Legrand me signalait, quelques jours plus tard, l'existence de ces nouveaux affleurements, m'en abandonnant, avec sa générosité habituelle, l'étude détaillée. Qu'il trouve ici l'expression de mon amicale reconnaissance.

Au cours de visites répétées, faites seul ou en compagnie de mon assistant R. Monteyne, et d'un groupe d'étudiants, MM. R. Brisbois, Ph. Mathieu et M. Verhaegen, que je remercie vivement pour leur aide, j'ai pu établir une stratigraphie de détail dans ces formations. En même temps se sont dégagées certaines conclusions en ce qui concerne la tectonique et la stratigraphie d'ensemble de cette région. Ce sont ces observations et ces conclusions qui constituent l'objet de ma note.

A. — STRATIGRAPHIE DES FORMATIONS ÉTUDIÉES.

En combinant les observations nouvelles qu'apporte le talus du chemin de fer dans la partie où il a été rafraîchi pour l'établissement du raccordement du chemin de fer des Sablières Van Meulenbeek (Bois de la Houssière), à celles que fournis-

sent les affleurements situés au Nord et au Sud de ce talus, on dispose à présent d'une coupe quasi continue, longue de près de 350 m. La voie étant à peu près exactement perpendiculaire à la direction des couches et à la schistosité qui les recoupe, on se trouve dans des conditions idéales pour étudier cette section.

Pour la facilité de la description, je diviserai la coupe en trois tronçons, dont le médian correspondra au raccordement.

1. Tronçon méridional.

Ce tronçon s'étend depuis le passage à niveau de la Ferme du Gouteux (km 24,650) jusqu'au début de la coupe du raccordement. Entre les km 24,625 et 24,580, une ancienne carrière entame le talus à l'Est du chemin de fer; elle expose des schistes siliceux, plutôt massifs bleu-noir à gris sombre, mouchetés de taches plus claires par altération. Dans une ancienne carrière en partie remblayée, située à l'Ouest du rail, près de la Ferme du Gouteux, ces mêmes roches montrent des passées celluluses, prenant l'aspect de schistes grauwackeux; elles renferment des restes de Crinoïdes, de Brachiopodes (Orthidés) et de Trilobites (Trinucléidés).

Dans ces deux groupes d'affleurements, l'orientation des couches est N. 55° W., avec une pente vers le Nord-Est passant de 20° au Sud à 36° au Nord. Elles montrent un ennoyage de 10° environ vers le Nord-Ouest.

Ces roches, plutôt massives, ne sont que peu ou pas recoupées par la schistosité si bien développée plus au Nord.

Au Nord des carrières, les affleurements sont très mauvais. Au km 24,550 on distingue des schistes fortement altérés, puis, au km 24,515, des tufs grossiers. Les observations faites plus au Nord suggèrent qu'entre ces deux points viennent passer les 8 à 10 m de base des tufs volcaniques.

En résumé, ce tronçon méridional de la coupe montre la superposition probable de 8 à 10 m de tufs grossiers, base du complexe pyroclastique, à une quarantaine de mètres de schistes siliceux ou grauwackeux, parfois fossilifères.

2. Tronçon médian (fig. 1, 2 et 3).

Le tronçon médian de la coupe correspond aux nouveaux affleurements mis en évidence par les travaux de raccordement des Sablières Van Meulenbeek. Long de 116 m, entre les km 24,400 et 24,516, il est affecté d'une série d'ondulations et

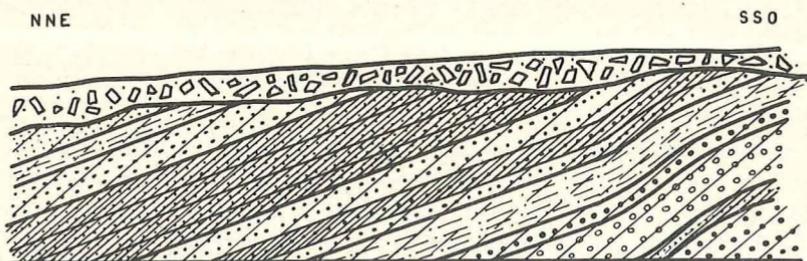


FIG. 1. — Relations de la schistosité et de la stratification; développement inégal de la schistosité suivant la granulométrie des bancs.

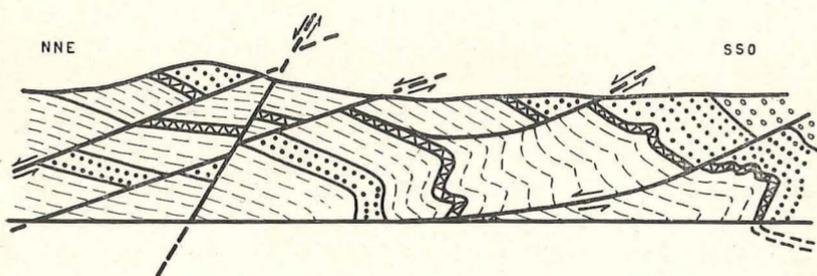
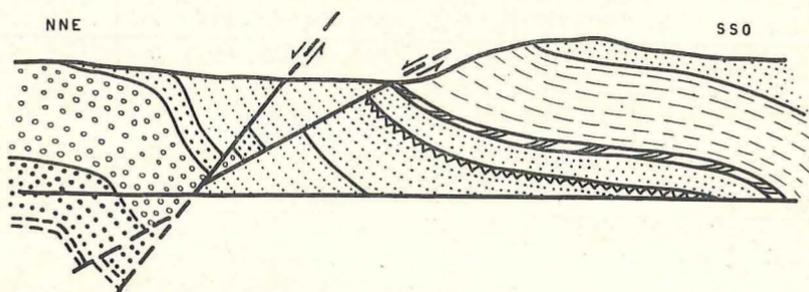


FIG. 2 et 3. — Détails des plis secondaires et des failles normales; afin de ne pas surcharger le dessin la schistosité a été omise.

de petites failles normales qui font que pour obtenir une stampe superposable à celle du tronçon méridional, il convient de le scinder en plusieurs éléments de coupe.

a) Un premier élément de coupe est compris entre l'extrémité méridionale de la coupe (0 m) et une faille normale pendant au Nord-Est de 40° (faille de 46^m50).

Il est essentiellement formé d'une série de couches inclinant dans leur ensemble au Sud-Ouest. Cette allure d'ensemble est compliquée par de petites ondulations anticlinales et synclinales déjetées dans la même direction. Un système complexe de failles normales, inclinant au Nord-Est, vient compliquer cette allure. Un filon de quartz, fourchu, pénètre les couches à 40^m50 de l'origine.

Ce fragment de coupe permet d'établir la succession suivante, de haut en bas :

	En m
Tufs verdâtres, assez fins	1,10
Lit kaolineux blanchâtre (portion riche en feldspath altéré).	0,10
Série de tufs à granulométrie croissant régulièrement vers le haut (séquence négative) :	
Tufs grossiers	1,60
Tufs moins grossiers	0,35
Tufs fins	0,25
Sur toute la hauteur de ces tufs sont distribués des galets bien roulés, atteignant 0 ^m 25 de diamètre, de porphyres leucocrates [Ech. 29]	2,20
Lit kaolineux blanchâtre (portion riche en feldspath altéré) ...	0,15
Tuffites (2) bleu sombre à grain fin	0,75
Tuffites sombres, à grain plus grossier	1,50
Tuffites à grain fin	1,10
Tuf fin, rugueux, poreux par altération, gris jaunâtre, à bandes de tuffite bleu sombre; cet horizon montre des stratifications obliques à sommet tronqué, indiquant une origine méridionale des éléments constitutifs [Ech. 28]	0,08
Tuf à grain fin, verdâtre, étroitement recoupé par la schistosité.	0,32
Tufs à grain fin, verdâtres, en petits bancs; le sommet, plus feldspathique, est fortement kaolinisé	1,00
Tufs à grain fin, analogues aux précédents	1,60
Hiatus : petite faille à 26 ^m 50.	

(2) Par *tufs* j'entends des roches grossières, uniquement pyroclastiques; par *tuffites*, des roches à grain fin, à aspect de schistes siliceux, combinant éléments pyroclastiques et éléments détritiques normaux (voir p. 189).

	En m
Tufs à grain fin, analogues aux précédents	1,25
Tufs moins fins	0,30
Tufs moyens	1,35
Tufs grossiers	0,70
Ces quatre niveaux forment un complexe à granulométrie décroissant régulièrement vers le haut et se poursuivant au delà de la faille de 26 ^m 50 jusqu'aux tufs à stratifications obliques de l'Ech. 28 (séquence positive).	
Lit kaolineux blanchâtre (niveau riche en feldspath altéré) ...	0,10
Complexe de tuffites gris-bleu, à grain généralement fin, à cassure parfois subesquilleuse; traces limonitiques de fossiles vers le sommet [Ech. 25, 26, 27]; env.	2,00
Lit kaolineux blanchâtre, localement noirci par des oxydes de manganèse	0,10
Tuffites gris-bleu	0,60
Banc de tufs grossiers	0,35
Complexe de tuffites gris-bleu, en petits bancs, visibles sur	1,30

C'est donc un ensemble de 18 m environ qu'expose cet élément de coupe.

Le tracé de celle-ci indique que, plus bas, doivent se trouver les 8 à 10 m de tufs grossiers signalés précédemment.

b) Un deuxième élément de coupe est compris entre la faille de 46^m50 et un accident à pente plus raide et ondulée apparaissant à 53^m50 du début de la coupe.

Entre ces deux accidents s'observe un massif de tufs grossiers verdâtres ou gris verdâtre, à vagues traces de fossiles limonitisés; ces roches, dont le grain moyen est de l'ordre du demi-millimètre, renferment de nombreux fragments anguleux de porphyre et de tuffites atteignant le centimètre; on observe de plus, disséminés dans la masse des tufs, des galets volumineux de porphyre blanchâtre ou gris-bleu [Ech. 23, 24, 35].

Par la présence de ces galets, comme par leur aspect général, ces roches paraissent identiques à celles apparaissant au sommet de la stampe précédente, immédiatement au-dessus desquelles je les place. Leur puissance visible est de l'ordre de 4^m50.

Si cette façon de faire est correcte, le rejet stratigraphique de la faille de 46^m50 est de l'ordre de 20 m.

c) Le troisième élément de coupe s'étend entre l'accident de 53^m50 et l'extrémité Nord de celle-ci. Il montre une série nor-

male à pente vers le Nord-Est, variant de 20° à 40°. Quelques petits accidents, ondulations et failles, troublent la régularité de cette section, sans cependant en affecter outre mesure la lisibilité.

Du Nord au Sud, et donc de haut en bas, la stampe relevée s'établit comme suit :

	En m
Tufs gris verdâtre à bleu clair, à grain fin, massifs, divisés en petits bancs [Ech. 12], visibles sur	2,00
Tuf zonaire, gris-bleu sombre, très fin, passant au schiste ciné-ritique [Ech. 11]; forme un petit banc de	0,20
Tufs gris verdâtre, à grain fin, en petits bancs	0,40
Tufs gris verdâtre, à grain très fin, en petits bancs	0,90
Tufs gris-vert, à grain fin, divisés en bancs de l'ordre de 0 ^m 20 [Ech. 10]	0,75
Tuffites gris-bleu clair, finement zonaires, montrant des bandes plus grossières, rugueuses et finement poreuses [Ech. 8] ...	0,48
Tufs assez grossiers, à mouchetures limonitiques dispersées; traces de fossiles [Ech. 9]	0,22
(Ces deux termes forment une séquence positive.)	
Tufs plus fins, à grain variable	0,55
Tufs gris verdâtre, à grain fin	0,20
Tufs grossiers, sans galets, de teinte gris-vert clair, à articles de Crinoïdes dispersés [Ech. 5 et 7]	0,50
Tufs verdâtres, à grain plus fin, variable	0,85
Tuffites assez grossiers, bleuâtres, zonaires [Ech. 6], visibles sur	0,50

Cette partie de la coupe expose donc près de 8 m de tufs et tuffites; à 92 m, un petit accident la sépare d'un petit massif compris entre deux failles, celle de 92 m et celle de 89 m. Ce dernier massif montre, de haut en bas :

	En m
Tufs gris-vert clair, à grain fin, divisés en minces feuillets [Ech. 3], visibles sur env.	1,25
Tuffites à grain fin, gris-noir à gris [Ech. 4], visibles sur env.	1,25

Ces 2^m50 de couches sont séparés par la faille de 89 m d'un massif continu, affecté de quelques ondulations anticlinales déversées au Sud-Ouest. Ce nouveau massif présente, de haut en bas, la succession suivante :

	En m
Puissante masse de tufs grossiers, gris-vert, à nombreux petits galets anguleux de tufs fins et de tuffites, plus rarement de petits galets de porphyre; à certains niveaux petits galets mous de schiste gris foncé luisant; horizons fossilifères à aspect grauwackeux : articles de Crinoïdes, débris de Brachiopodes et de Trilobites dilacérés (céphalon, articles thoraciques); à plusieurs reprises, lits de tufs emballant des fragments anguleux de tuf fin et de tuffite [Ech. 2, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22], visibles sur env.	10,00

BULL. SOC. BELGE DE GEOL., DE PALEONT. ET D'HYDROL., TOME LXI(1952), FASC.2.

G.MORTELMANS - OBSERVATIONS NOUVELLES SUR LES "PORPHYROIDES,, CARADOCIENS DE LA GARE D'HENNUYERES -

PLANCHE I A INTERCALER ENTRE LES PAGES 176 ET 197.

ERRATA

P.178, EN BAS :

AU LIEU DE : TRONÇON MEDIAN (FIG.1,2,3) LIRE : TRONÇON MEDIAN (P.L.I)

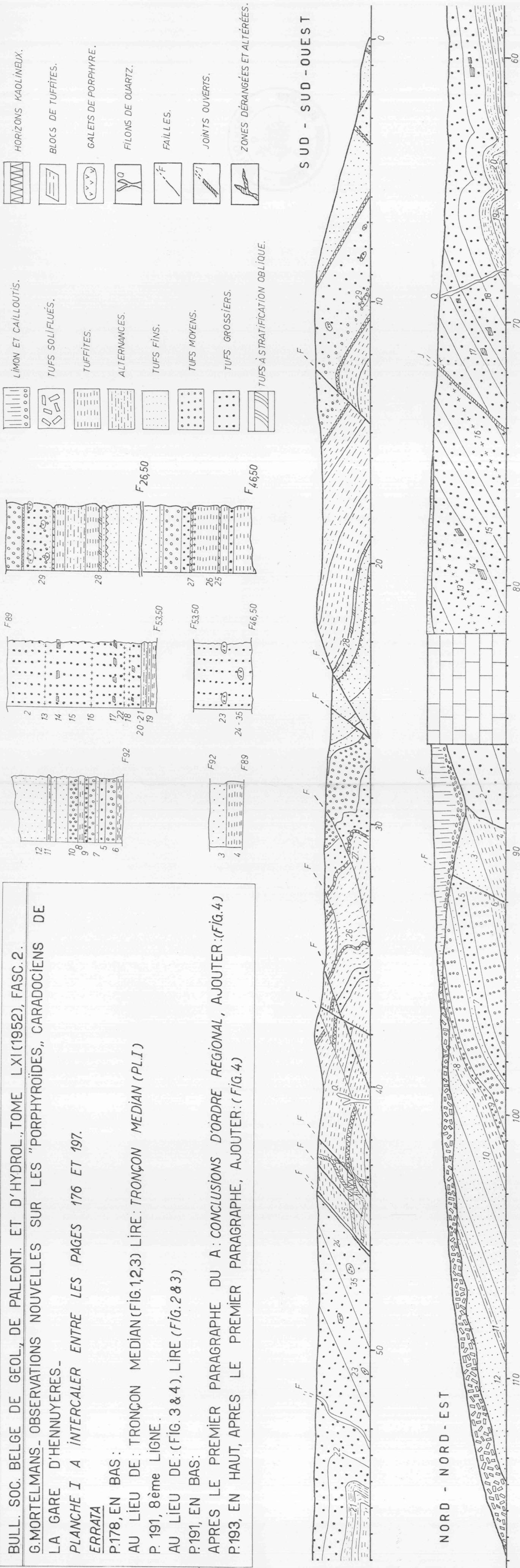
P. 191, 8ème LIGNE.

AU LIEU DE : (FIG. 3 & 4), LIRE (FIG. 2 & 3)

P.191, EN BAS :

APRES LE PREMIER PARAGRAPHE DU A : CONCLUSIONS D'ORDRE REGIONAL, AJOUTER : (FIG.4)

P.193, EN HAUT, APRES LE PREMIER PARAGRAPHE, AJOUTER : (FIG.4)



	En m
Alternances de tufs grossiers et de tuffites [Éch. 20, 21]	0,40
Alternances de tufs fins, poreux et rugueux et de lames de tuffites compacts, gris sombre [É 19]; le grain croît vers le haut	0,30
Tuffites zonaires, gris-bleu sombre, visible sur env.	0,50

Ce tronçon de succession, correspondant à une stampe visible de plus de 11^m20, bute, par la faille ondulée de 53^m50, contre les éléments de coupe précédemment décrits. La somme de tous les tronçons de stampe exposés dans le talus du raccordement fournit une succession de tufs et tuffites puissante de quelque 45 m, à laquelle il faudrait ajouter la valeur des hiatus déterminés par les diverses petites failles. Ceux-ci paraissent peu importants, de sorte que c'est à environ 50 m qu'il faut estimer la puissance totale de cette coupe.

3. Tronçon septentrional.

Ce tronçon s'étend à l'Est du chemin de fer, le long du ruisseau de Cœrcq et du sentier joignant Hennuyères-station à Hennuyères-village. La coupe, plus discontinue, correspond aux km 24,295 à 24,400, fin du talus du raccordement.

En 24,400, les tufs fins sont surmontés des mêmes roches complètement dérangées par solifluxion. Après un hiatus stratigraphique de 5 à 10 m, on peut observer en place, dans le fossé bordant le sentier, un petit affleurement de schistes phylladeux bleu sombre, mouchetés de gris par altération; ces schistes, beaucoup plus fissiles que ceux du Gouteux, sont orientés N. 60° W. et pendent de 40° environ vers le Nord-Est.

Des débris de roches semblables jonchent le fond du fossé.

A 8 m environ au Sud de l'axe du pont du ruisseau de Cœrcq un nouvel affleurement de schistes phylladeux zonaires, bleu sombre, occupe le fond du fossé; la pente est à présent de 60° vers le Nord-Est.

Ces observations conduisent à placer quelque 45 m de schistes phylladeux sombres au-dessus des tufs du raccordement.

A partir du pont du ruisseau jusqu'au coude du sentier, talus, sentier et ruisseau montrent, sur 30 m environ, une série de bons affleurements formant un nouveau complexe de tufs grossiers. Ceux-ci diffèrent de ceux du raccordement par leur ciment calcaire abondant, au point de faire de certains échantillons de véritables calcaires grossiers. Ces tufs particuliers

renferment des fragments des schistes phylladeux sous-jacents, des fragment de calcaire cristallin gris et de petits blocs arrondis de lave porphyrique gris clair. Cette série, épaisse de 30 m environ, est coupée, à 20 m environ de la base, par un épisode peu puissant de schistes phylladeux bleu sombre [Ech. 1, 1 A, 1 B, 36].

Dirigées N. 55° W. à N. 60° W., ces roches inclinent de 55° à 60° vers le Nord-Est. Quelques joints, inclinés à 40° dans le même sens, et donc parallèles à la schistosité relevée dans le raccordement, divisent les tufs en bancs de 60 cm environ.

Au delà de ces affleurements, la vallée tend à s'élargir et l'on ne peut plus faire aucune observation. On peut supposer qu'une nouvelle masse de schistes vient surmonter ces tufs supérieurs.

Ce n'est qu'à un kilomètre plus au Nord, au lieu dit Warichaix, à hauteur des exploitations d'argile yprésienne des Tuileries d'Hennuyères, que se rencontrent de nouveaux affleurements. Un chemin creux expose des schistes phylladeux gris-bleu sombre, zonaires, en allure subhorizontale, recoupés par une schistosité serrée, orientée N. 50 W., pendant toujours au Nord-Est de 40°.

Étant donnée cette allure, on peut supposer que ces roches viennent surmonter celles étudiées plus au Sud et constituent le cœur d'une ondulation synclinale.

En résumé, le tronçon Nord permet d'établir la stampe suivante, de haut en bas :

Schistes supposés.	En m
Tufs volcaniques à ciment calcaire; env.	30,00
Schistes phylladeux bleu foncé, parfois zonaires; env.	45,00
Tufs volcaniques fins, sommet du tronçon médian.	

Synthèse stratigraphique (fig. 4).

En mettant bout à bout les tronçons de stampe établis au cours de cette description on obtient la succession générale suivante, de haut en bas :

	En m
E. — Schistes supérieurs puissance inconnue	
D. — Tufs volcaniques à ciment calcaire, avec intercalations de phyllades bleu foncé; env.	30,00
C. — Schistes phylladeux bleu foncé, zonaires ou non; env. ...	45,00
B. — Tufs volcaniques non calcaires, parfois fossilifères, à intercalations de tuffites zonaires; au moins	65,00
A. — Schistes siliceux ou grauwackeux, sombres, parfois fossilifères; vus sur env.	40,00

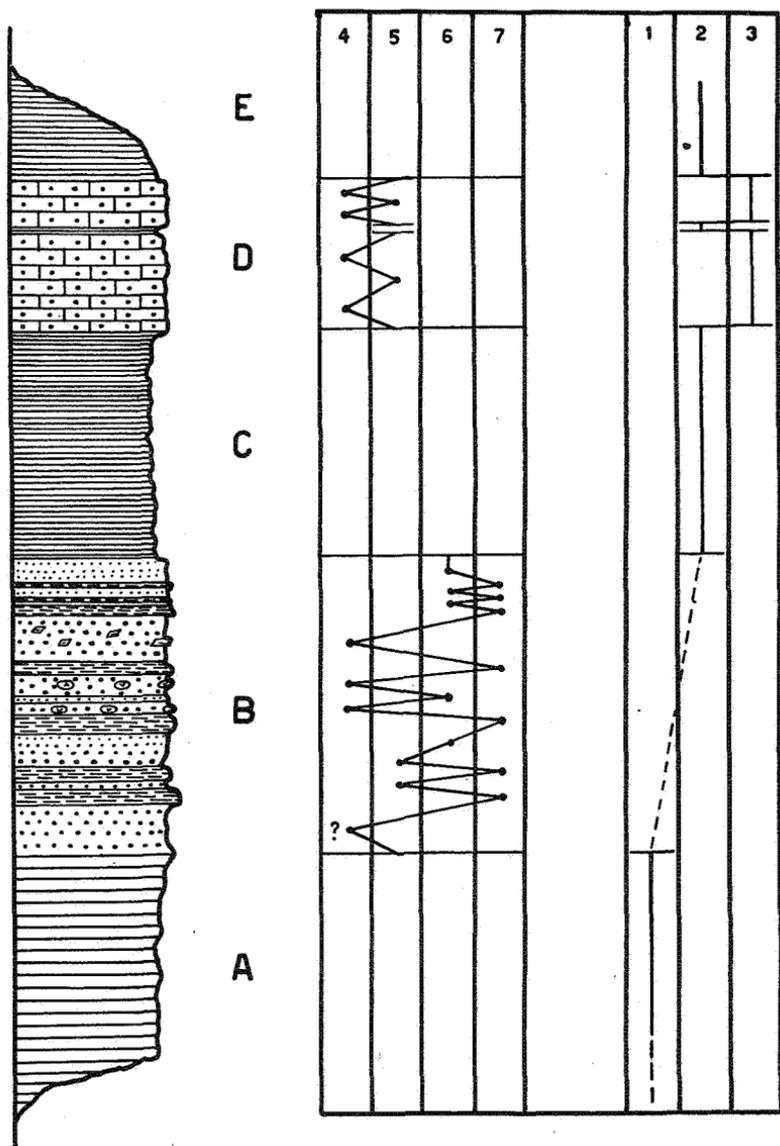


FIG. 4. — Essai d'interprétation lithologique détachant les pyroclastiques de l'évolution sédimentaire normale.

1. Argile sableuse. — 2. Argile pure. — 3. Calcaire. — 4. Blocs et galets. — 5. Tufs grossiers. — 6. Tufs fins. — 7. Tuffites.

La puissance totale de la partie exposée est donc de l'ordre de 180 m au minimum.

Quant au terme B de cette succession, on peut, en groupant les types lithologiques semblables, en donner la définition suivante, de haut en bas :

	En m
19. Tufs généralement fins; plus de	5,00
18. Tuffites zonaires passant vers le bas à des tufs grossiers ...	0,70
17. Tufs à grain fin	2,10
16. Tuffites; plus de	0,50
————— Faille de 92 m —————	
15. Tufs à grain fin; plus de	1,25
14. Tuffites; plus de	1,25
————— Faille de 89 m —————	
13. Série de tufs grossiers fossilifères emballant des fragments de tufs à grain fin et de tuffites; plus de	10,00
12. Alternance de tufs à grain fin et de tuffites	0,70
11. Tuffites; plus de	0,50
————— Faille de 53 ^m 50 —————	
10. Série de tufs grossiers à gros galets de porphyre; plus de	4,40
————— Faille de 46 ^m 50 —————	
9. Série de tufs à grain fin, avec minces intercalations kaolineuses; plus de	1,20
8. Tufs grossiers à gros galets de porphyre	2,20
7. Tuffites	3,50
6. Tufs à grain fin	3,00
————— Faille de 26 ^m 50 —————	
5. Série de tufs à grain fin devenant progressivement grossiers vers le bas	3,60
4. Tuffites à minces intercalations kaolineuses	2,80
3. Tufs grossiers	0,35
2. Tuffites; plus de	1,30
1. Complexe probable de tufs grossiers; env.	10,00

B. — LITHOLOGIE DES FORMATIONS ÉTUDIÉES.

La plupart des échantillons récoltés au cours des levés ont fait l'objet d'une étude en lame mince.

Les résultats détaillés de ces examens seront intégrés à un mémoire d'ensemble consacré aux « porphyroïdes » brabançons et à leurs variations de facies.

Il m'a cependant paru utile de définir en quelques mots les caractères essentiels des roches examinées.

1. Les laves.

Les laves, dont les éléments dissociés constituent une portion importante des tufs grossiers, s'y rencontrent encore en petits fragments anguleux ou en galets volumineux bien arrondis. Il s'agit généralement de roches porphyriques, leucocrates ou hololeucocrates, à feldspaths frais abondants et rares phénocristaux de quartz corrodés. Deux variétés existent, l'une blanchâtre, l'autre verdâtre. Sous le microscope, ces laves montrent des phénocristaux de plagioclases acides nageant dans un fond microcristallin formé d'un très grand nombre de microlithes plagioclasiques à structure fluidale et d'infimes granules de quartz interstitiel; à ces éléments s'ajoutent, dans certaines laves, des plages de chlorite riche en rutile (biotite titanifère chloritisée) et de leucoxène à réseau typique (ilménite altérée).

La détermination exacte des plagioclases qui semblent appartenir au groupe albite-oligoclase reste à faire. Ces laves semblent pouvoir être provisoirement rapprochées des *dellénites* et des *dacites*.

2. Les tufs.

Les tufs volcaniques ou « porphyroïdes » tuffiques peuvent rentrer dans trois catégories granulométriques : grossiers, moyens et fins. Sur le terrain toutes se caractérisent par leur aspect rugueux, parfois poreux, et leur teinte verdâtre.

Les *tufs grossiers* sont essentiellement formés d'un empilement de petits galets amygdaloïdes ou anguleux de lave, parfois de schistes ou de tuffites, atteignant 1 à 2 mm; ces gros éléments élastiques sont séparés par des filets ou des amas phylliteux formés de chlorite ou de séricite. Il s'y ajoute des phénocristaux de quartz et de plagioclases, brisés ou usés, de taille généralement inférieure au mm. Des taches de leucoxène ou de limonite se rencontrent çà et là. Un zonage dû à l'existence de lits schistoïdes plus ou moins continus apparaît dans certaines laves; ces limons renferment, disséminés dans un fond phylliteux, des feldspaths et des quartz brisés.

La pâte de fond de la roche contient en outre, en quantité variable, des microlithes de feldspath, orientés parallèlement aux phyllites, avec lesquelles on peut les confondre.

Les *tufs moyens* ne diffèrent guère des premiers que par une granulométrie moyenne plus faible et une moins grande abondance relative des fragments de lave; le grain moyen est voisin de 0,5 mm.

Les *tufs fins* ne renferment plus guère que des fragments de quartz et de plagioclases de l'ordre de 0,2 à 0,3 mm répartis dans un fond phylliteux formé de chlorite et de séricite auxquelles s'ajoutent, en quantité variable, les microlithes de feldspath de la pâte des porphyres. Dans certains types, alternent, avec des lits riches en phyllites, des lits de microquartzite phylliteux très fin (grains de 0,01 mm environ), par lesquels se fait le passage aux tuffites.

3. Les tufs calcaireux.

La série supérieure de tufs est formée de *tufs à ciment calcaire* dans lesquels ce ciment peut devenir prédominant. Il s'agit en général de tufs grossiers à galets anguleux de porphyre et de schiste atteignant 2 mm, qu'accompagnent des phénocristaux brisés ou usés de plagioclases et de quartz ne dépassant guère 0,5 mm. Des amas de séricite mêlés de microlithes de feldspath s'ajoutent à ces éléments détritiques qui sont pris dans une masse cristalline de calcite plus ou moins abondante suivant les échantillons, en plages granoblastiques de 0,1 à 0,4 mm. Quelques grandes plages de calcite à macles courbes atteignent 4 à 5 mm.

Les éléments détritiques enrobés dans ce fond carbonaté sont souvent plus ou moins calcifiés.

Certaines variétés sont formées à peu près uniquement d'un agrégat granoblastique de calcite où flottent de rares éléments détritiques : ce sont de véritables *calcaires grossiers*. On ne reconnaît sous le microscope aucun élément figuré, crinoïde ou autre.

4. Les tuffites.

Sur le terrain ces roches se distinguent des tufs par leur compacité, leur finesse, leur zonage souvent mieux marqué, leur tonalité sombre et leur ressemblance générale avec des schistes siliceux. Tous les intermédiaires existent entre les deux types de roches, bien que leurs contacts soient en général bien tranchés.

On peut, sous le microscope, distinguer plusieurs variétés d'après les dimensions des éléments détritiques et les proportions relatives des trois minéraux formant le fond de la roche : quartz, séricite et chlorite, en éléments de 0,01 mm environ. On aura de la sorte des microquartzites, des microquartzites phylliteux, des séricitoschistes quartzitiques, etc.

Les éléments détritiques plus grands comportent des fragments dérivés des porphyres : quartz, plagioclases, plus rarement microlithes ou fragments de laves, et des minéraux ubiquistes à toutes les roches schisteuses du Silurien belge : petits quartz anguleux, phyllites, microgalets formés de feuilles de chlorite et de muscovite, etc. Les dimensions de ces gros détritiques sont en moyenne de 0,1 à 0,2 mm.

En résumé ces roches sont intermédiaires, génétiquement, entre les schistes siluriens normaux et les tufs volcaniques; elles correspondent à un sédiment détritique normal auquel s'est ajoutée une certaine quantité de détritiques accidentels produits de l'érosion d'épanchements porphyriques.

C'est pour de telles roches que Mügge a créé le terme *tuffite* ⁽³⁾.

En résumé, les tufs et les tuffites apparaissent, ainsi que l'avait déjà montré E. Mathieu [6], comme des roches détritiques formées d'éléments arrachés par l'érosion à des massifs ou des coulées volcaniques émergés. On verra plus loin la conclusion à tirer de ce fait. Il n'existe dans ces roches aucune bombe, lapilli ou cendre qui justifierait le nom de cinérites.

Ces roches se sont déposées en milieu marin, ce qu'indiquent les fossiles rencontrés, Crinoïdes Brachiopodes et Trilobites, sans doute à profondeur très modérée : présence de stratifications obliques tronquées, présence de galets de lave, remaniement des couches sous-jacentes.

C. — TECTONIQUE DES FORMATIONS ÉTUDIÉES.

On peut distinguer dans la coupe d'Hennuyères trois modes d'enregistrement des sollicitations tectoniques : plis, schistosité et failles.

1. Les plis.

L'allure d'ensemble de la coupe indique une série normale de couches pendant régulièrement au Nord-Est, avec une pente qui passe de 20° environ au Sud (passage à niveau du Gouteux)

⁽³⁾ *Tuffite*, MÜGGE, 1893, A general term for composite clastic rocks, in which both volcanic (pyroclastic) and detrital (epiclastic) materials are present in considerable amount [4, p. 230].

à 60° environ du Nord (pont sur le ruisseau de Coercq). C'est là d'ailleurs l'allure générale que présente entre Senne et Senette, partout où il est étudiable, l'horizon des « porphyroïdes » et des sédiments qui l'encadrent. On verra plus loin les conclusions à tirer de ce fait.

Dans le détail, cette allure est plus complexe, puisque de petites ondulations anticlinales et synclinales viennent la troubler. Ces plis secondaires sont tous déversés au Sud-Ouest, leur surface axiale inclinant de 40° environ vers le Nord-Est.

Cette allure est en accord avec l'hypothèse, formulée depuis longtemps déjà, de poussées venant du secteur Nord [2]. Elle indique, d'autre part, que le paquet de couches étudiées appartient au flanc Sud d'un grand synclinal déversé au Sud-Ouest.

2. La schistosité.

Certains horizons du complexe tufs-tuffites ont développé, sous l'influence des efforts tectoniques, une schistosité plus ou moins bien marquée (« fracture cleavage »). Là où elle se développe, cette schistosité n'affecte pas de la même façon tous les bancs; certains sont divisés en plaques épaisses, d'autres en plaques plus minces; les figures 1 à 3 illustrent quelques aspects de ce clivage et de sa localisation. Ce sont surtout les tufs moyens et fins qui l'enregistrent; il se marque habituellement moins bien dans les tufs grossiers, manque dans les tufs à ciment calcaire et fait généralement défaut dans les tuffites. Les schistes siliceux ou grauwackeux du Gouteux n'en sont guère affectés; par contre, il se développe très bien dans les phyllades de Warichaix, au Nord de la station d'Hennuyères. La direction de ce clivage est identique à celle des couches, N. 60° W. en moyenne; son inclinaison est très régulièrement de 40° vers le Nord-Est, coïncidant ainsi avec la direction et la pente des surfaces axiales des plis observés.

Cette donnée cadre aussi avec l'hypothèse de poussées venant du secteur Nord-Est [2].

3. Les failles.

Toute une série de petites failles interrompent la continuité de la coupe du raccordement. Ces failles inclinent toutes au Nord-Est. Cependant, alors qu'on a généralement admis que les failles pied Nord du massif du Brabant sont des failles inverses, celles qui apparaissent dans cette coupe sont toutes

des accidents normaux, La fine stratigraphie établie dans ces dépôts permet d'établir en effet que la lèvre Nord est toujours descendue par rapport à la lèvre Sud. Cette observation est de nature à faire réviser certaines affirmations trop rapidement formulées en ce qui concerne le style des faillages du massif du Brabant.

Dans la coupe d'Hennuyères, on peut distinguer deux groupes principaux de failles normales (fig. 3 et 4). Le premier incline de 20° à 30° vers le Nord-Est. Il s'y associe quelques cassures secondaires de même sens, courbes, à pente encore plus faible; un de ces accidents s'amortit dans un lit kaolineux (fig. 3); le second est formé de failles plus récentes, recoupant les premières; elles ont une pente plus raide d'environ 55° au Nord-Est.

4. Accidents divers.

En plus des accidents décrits on relève quelques cassures ouvertes, kaolineuses, correspondant, semble-t-il, tantôt à l'ouverture de joints de schistosité, tantôt à celle de joints sans rejet, parallèles aux failles normales.

Enfin, quelques filons de quartz, à forte pente Sud, sont postérieurs à toutes ces structures.

III. — SYNTHÈSE GÉNÉRALE ET CONCLUSIONS.

Au terme de cette description détaillée des affleurements d'Hennuyères, on peut chercher à en ordonner les résultats en une synthèse générale d'où pourront se dégager des conclusions de deux ordres, régional et général.

A. — CONCLUSIONS D'ORDRE RÉGIONAL.

Celles-ci intéressent la stratigraphie et la tectonique. Au point de vue stratigraphique, la coupe d'Hennuyères a permis d'étudier en détail quelque 180 m de couches comportant deux puissants épisodes pyroclastiques.

Elle débute par des schistes plutôt grossiers, quartzeux ou grauwackeux, d'âge caradocien supérieur (zone à *Pleurograptus linearis*), dont le dépôt est brusquement interrompu par l'apparition massive d'éléments d'origine volcanique donnant naissance à une puissante série de tufs et de tuffites. L'absence de bombes, lapilli ou cendres indique qu'il ne s'agit

pas de cinérites; il n'y a, d'autre part, dans ces roches aucun indice qui permette de penser à des éruptions sous-marines. Toutes les observations convergent par contre pour montrer qu'il s'agit de matériaux détritiques arrachés et classés par les vagues à des coulées de laves porphyriques émises sur une terre émergée. Mes observations rejoignent ici celles d'E. Mathieu sur les tufs de Grand-Manil [6].

L'examen détaillé de cette série inférieure de tufs et de tuffites permet d'y déceler trois maxima complexes de clasticité : le premier, mal exposé, se trouve à la base de la série; le deuxième, situé vers le milieu, renferme de gros galets de porphyre bien roulés; le troisième, enfin, contient des blocs encore anguleux des tuffites sous-jacentes. La question de savoir si ces maxima de clasticité correspondent à des éruptions paroxysmales reste pour l'instant insoluble. Entre ces maxima de clasticité s'inscrivent plusieurs minima correspondant à des phases pendant lesquelles une sédimentation à peu près normale avait repris, formée de détritiques fins auxquels venaient s'ajouter des éléments pyroclastiques en quantité réduite : ce sont les horizons de tuffites. Peut-être l'activité volcanique avait-elle complètement cessé à ces moments.

Après le dépôt de ce premier complexe pyroclastique s'opère celui d'une masse de phyllades correspondant à une sédimentation détritique plus fine encore que celle des schistes inférieurs.

Elle est suivie de la formation d'un second complexe de tufs volcaniques qui diffèrent des premiers par leur ciment calcaire, formant parfois la quasi-totalité de la roche. Le dépôt de ces tufs particuliers est suivi de celui d'une nouvelle masse de phyllades.

Si l'on accepte de considérer l'élément pyroclastique comme clastique accidentel, on voit que ces trois termes supérieurs représentent un véritable cycle sédimentologique, partant des argiles pour aboutir aux argiles, en passant par une phase calcaire. De même, les tufs inférieurs peuvent être considérés comme clastiques accidentels venant se superposer à une évolution sédimentologique se faisant des argiles sableuses (schistes du Gouteux) aux argiles pures (phyllades intercalaires). Une telle façon d'exprimer les faits a l'avantage de détacher l'accidentel, dépôt des tufs volcaniques, du phénomène général qui est l'évolution d'un bassin de sédimentation suivant les phases successives : argile sableuse, argile, calcaire, argile. On aurait

de la sorte deux grands épisodes volcaniques se superposant à cette évolution.

On examinera plus loin les conclusions paléogéographiques à tirer de ces faits.

Au point de vue de la tectonique régionale du socle brabançon, on a vu que les couches d'Hennuyères forment une série normale à pente Nord-Est. C'est là ce qu'on observe partout où ces formations sont visibles, de la Senne à la Sennette.

Cette pente généralisée vers le Nord-Est apparaît comme une exception dans l'allure tectonique d'ensemble du massif du Brabant, qui montre, du Nord au Sud, des couches de plus en plus récentes inclinant assez régulièrement au Sud, avec des pentes moyennes voisines de 60°.

Une disposition comme celle d'Hennuyères ne peut s'expliquer que par l'existence, dans cette série à pente Sud, d'un pli en chaise dont ces formations constituent le siège. La présence de ce pli en chaise implique que les « porphyroïdes » et les couches qui les encadrent devraient apparaître trois fois en affleurement, formant trois bandes successives dont la septentrionale sera à pente Sud, la médiane à pente Nord, la méridionale à pente Sud.

Du fait que seule la médiane existe en affleurement on est amené à considérer qu'elle est encadrée, au Nord comme au Sud, par deux grandes failles de charriage : la faille Nord doit faire reposer de l'Ordovicien inférieur à pente Sud sur la série d'Hennuyères, la faille Sud cette dernière série sur du Gothlandien également à pente Sud (fig. 5).

Ce sont là des conclusions auxquelles P. Fourmarier était déjà arrivé en 1912 par des voies différentes [2]. La faille Sud est sa « *faille de Fauquez* », bien visible au Nord de Fauquez, suivant le tracé qu'en a ultérieurement donné R. Coustry [1]. La position de l'accident septentrional est moins aisée à déterminer. Sa recherche fait partie des levés en cours.

L'allure de la schistosité et des plis secondaires est en accord avec cette hypothèse qui fait des formations étudiées le flanc méridional d'un synclinal déversé au Sud-Ouest. Ici encore nos observations sont en accord avec les conceptions tectoniques de P. Fourmarier, qui réclamaient des allures en bassin au Nord des « porphyroïdes » de Rebecq-Rognon; on peut accepter pour ce bassin le nom de « *synclinal de Quenast* » qu'il avait proposé [2].

Une conclusion intéressante à laquelle conduit cette conception est que l'étage Ashgillien, dont les couches n'ont pas encore été identifiées dans le massif du Brabant, est à rechercher non pas au Sud des « porphyroïdes », ce que suggère l'examen de la Carte géologique, mais bien au Nord de ceux-ci. Il pourrait en être de même pour la base du Gothlandien. Ce sont là des conclusions à ne pas perdre de vue au moment où reprennent les levés en vue de la publication d'une nouvelle édition de cette Carte.

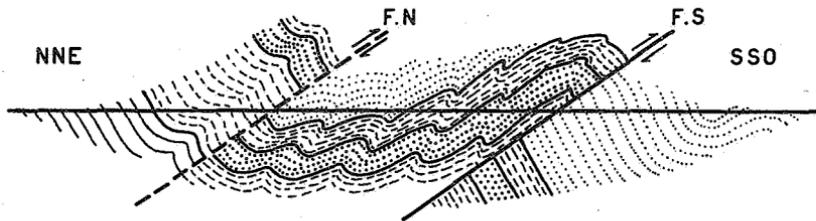


FIG. 5. — Coupe géologique schématique illustrant la conception du pli en chaise coupé par deux failles de charriage :

Traits continus : Cambrien; traits discontinus : Ordovicien, avec, en gros points, le Caradoc; petits points : Silurien (Gothlandien).

L'observation de la schistosité et de sa localisation à certains horizons seulement suggère enfin que les couches d'Hennuyères ont évolué à une profondeur relativement modérée, au voisinage plus ou moins immédiat du « front de schistosité » de P. Fourmarier [3].

Telles sont les principales conclusions régionales auxquelles conduit l'étude de la coupe d'Hennuyères.

B. — CONCLUSIONS D'ORDRE GÉNÉRAL.

Si l'on cherche à déborder le cadre restreint du bassin hydrographique Senne-Sennette pour inscrire les observations faites à Hennuyères dans celui, plus vaste et plus général, de la paléogéographie ordovicienne et silurienne (gothlandienne), on voit se dessiner d'autres conclusions dont la nature partiellement hypothétique est loin de nous échapper.

On sait qu'un des caractères du géosynclinal calédonien de l'Europe du Nord fut, au moins dans certaines de ses parties, l'abondance des phénomènes volcaniques. C'est le cas notam-

ment en Grande-Bretagne. La localisation de ce volcanisme sur des cordillères temporaires a même fait comparer les conditions régnant dans ce géosynclinal à celles qu'offrent à l'heure actuelle les guirlandes insulaires du Sud-Ouest du Pacifique. Ce phénomène s'est répété à diverses reprises et l'on connaît, dans le Sud-Ouest de l'Angleterre, des épisodes volcaniques qui apparaissent, dans les séries sédimentaires locales, sensiblement aux mêmes niveaux que les « porphyroïdes » brabançons. C'est le cas notamment dans le Shropshire, où les « couches de Hagley » sont formées de deux séries volcaniques comprenant des tufs, des brèches et occasionnellement des coulées de lave, séparées par une masse de schistes tendres; ces couches représentent soit le sommet de la zone à *Dicranograptus clingani* (zone 12), soit la base de la zone à *Pleurograptus linearis* (zone 13) [8].

On a vu que les caractéristiques sédimentologiques des « porphyroïdes » brabançons conduisent à l'hypothèse d'une terre émergée, génératrice de matériel pyroclastique, revêtant sans doute l'allure d'une ride anticlinale jalonnée de volcans. Rien, dans les affleurements du Brabant, ne semble en faveur d'une situation septentrionale de cette ride par rapport à la bande des « porphyroïdes ». Par contre, lui supposer une position méridionale paraît trouver un début au moins de confirmation dans l'existence, à Hennuyères, d'un horizon de tufs à stratifications obliques tronquées pour lequel l'origine des matériaux est manifestement méridionale. C'est donc sous la structure hercynienne du Bassin de Namur qu'il faudrait pouvoir rechercher les restes de cette cordillère.

Plusieurs centres volcaniques distincts devaient jalonner cette ride. En effet, les variations latérales de facies offertes par les « porphyroïdes » brabançons font apparaître au moins deux zones grossières, à Rognon et à Fauquez : à Rognon se rencontrent des variétés conglomératiques, riches en galets de lave, tandis qu'une partie des roches pyroclastiques de Fauquez est formée d'un empilement de blocs subanguleux de porphyre, véritable brèche ou agglomérat volcanique. Ces localités étaient sans doute fort proches de centres volcaniques émettant d'ailleurs des laves assez différentes. Hennuyères, par contre, et surtout Grand-Manil devaient représenter des régions plus éloignées de ces centres éruptifs, où, sous l'action des vagues et des courants marins, les matériaux pyroclastiques étaient étalés et classés, parfois aussi mêlés à un sédiment

détritique normal; dans ces régions plus lointaines, les organismes venaient s'ajouter, en abondance variable, aux éléments pyroclastiques et détritiques normaux.

Telle est l'image qu'on peut se faire de la partie brabançonne du géosynclinal calédonien pendant le Caradocien supérieur.

Rien ne permet jusqu'ici de supposer que cette cordillère volcanique ait apparu avant cette période; aussi est-on tenté de rattacher sa naissance et le volcanisme qui s'y installe à un épisode tectonique important, véritable phase précoce de l'orogénèse calédonienne. On sait que des mouvements tectoniques considérables ont eu lieu, en diverses régions des Iles Britanniques, au début et pendant le Caradoc, et surtout entre le Caradoc et le Llandovery. C'est encore sensiblement à la même époque que s'est édifiée, aux États-Unis, l'importante chaîne taconique.

En Belgique même, les recherches de P. Michot [7] et d'A. Stainier [9] ont fait apparaître l'existence d'une discordance dans les couches ordoviciennes du bord Sud de la bande silurienne de Sambre-et-Meuse : les grès du Caradocien supérieur, débutant par un conglomérat à pâte calcaire souvent organogène, à galets bien roulés de calcaires, de schistes tendres ou siliceux, voire de laves (on notera la similitude, aux organismes près, avec les tufs supérieurs d'Hennuyères), reposent en discordance angulaire sur les couches du Llandeilo, dont elles tronquent les plis.

G. Waterlot, dans son important mémoire sur l'évolution tectonique de l'Ardenne pendant les périodes calédonienne et hercynienne [10], a montré que, selon toute vraisemblance, le plissement des massifs cambro-ordoviciens de l'Ardenne s'était produit partout sensiblement à la même époque, sous l'action d'un seul et même train d'ondes tectoniques s'atténuant progressivement vers le Nord jusqu'en bordure Sud de la bande silurienne de Sambre-et-Meuse. Ce plissement, que suit l'exondaison de la Haute-Ardenne, est, selon lui, et c'est aussi mon opinion, à placer au début du Caradoc : c'est sa *phase ardennaise*, ou *phase éocalédonienne* (P. Fourmarier), des plissements calédoniens; elle vient s'inscrire dans le cadre plus général de l'orogénèse taconique.

Les conclusions paléogéographiques auxquelles conduit l'étude des « porphyroïdes » brabançons montrent qu'au delà du rivage Nord du continent caradocien de la Haute-Ardenne,

ces mouvements éocalédoniens ont fait naître une ride plus modeste, jalonnée de volcans, séparant un sillon marin méridional du géosynclinal calédonien proprement dit.

Dès ce moment apparaît donc un trait paléogéographique important, que l'on retrouvera plus tard, lorsque la mer du Ludlow supérieur ne sera plus représentée chez nous que par un étroit golfe condrusien occupant la bordure septentrionale de la bande de Sambre-et-Meuse et s'ouvrant à l'Ouest, par l'Artois, sur la mer galloise [10].

Université Libre de Bruxelles,
Laboratoire de Géologie.

BIBLIOGRAPHIE.

1. COUNTRY, R., Note sur la tectonique du Silurien aux environs de Fauquez (*A.S.G.B.*, t. LIV, 1930-1931, p. B. 23).
2. FOURMARIER, P., La tectonique du Brabant et des régions voisines (*Mém. Acad. roy. de Belgique*, Cl. Sc., in-4°, 2^e série, t. IV, 1912, 95 p., 22 fig., 1 carte).
3. — Aperçu sur les déformations intimes des roches en terrains plissés (*A.S.G.B.*, t. LXXV, 1951-1952, pp. B.2181-194).
4. HOLMES, A., *The Nomenclature of Petrology* (Londres, 1920).
5. LERICHE, M., Compte rendu de l'Excursion du 4 mai 1924, dans la vallée du ruisseau de Cœrcq, du bois de la Houssière et dans la vallée de la Sennette (*B.S.B.G.P.H.*, t. XXXIV, 1924, pp. 42-53).
6. MATHIEU, E., La tuffoïde kératophyrique de Grand-Manil (*Ibid.*, t. XIX, 1905, pp. 499-525).
7. MICHOT, P., Une discordance à la base du Caradocien dans la bande silurienne de Sambre-et-Meuse (*Bull. Acad. roy. de Belgique*, Cl. Sc., 5^e série, t. XVII, 1931, n° 6, p. 823).
8. POCOCK, R. W. and WHITEHEAD, T. H., *British Regional Geology, The Welsh Borderland* (Second Edition), 1948.
9. STAINIER, A., Observations sur la pointe silurienne de Puagne (*B.S.B.G.P.H.*, t. XXXVI, 1936, p. 113).
10. WATERLOT, G., L'évolution de l'Ardenne au cours des diverses phases des plissements calédoniens et hercyniens (*B.S.G.Fr.*, t. XV, 1945, pp. M. 3-44).

DISCUSSION.

M. I. de Magnée demande si aucune cinérite n'a été trouvée par M. Mortelmans et s'étonne aussi que dans les sédiments voisins ne se retrouve aucun élément projeté par le volcan dont l'existence est supposée.

**L'âge de l'étage de Stanleyville (série du Lualaba)
et ses conséquences pour la stratigraphie du Congo (*).**

I. — ÂGE DE L'ÉTAGE DE STANLEYVILLE (),**

par P. DE SAINT-SEINE.

Dans le Congo belge central, les argilites bitumineuses, qui couvrent de vastes espaces dans la région de Stanleyville-Ponthierville, font partie de l'étage inférieur, dit de Stanleyville, de la Série du Lualaba (Passau, 1923, Cahen et *alia*, 1946, Cahen, 1948). Cet étage, caractérisé jusqu'à ce jour par de rares poissons de détermination douteuse (Leriche, 1911, 1920) et des Entomostracés (Marlière, 1948, 1950 *a*, 1950 *b*), était considéré comme Triasique supérieur ou Rhétien par M. Leriche, tandis que Haughton (1924), Veatch (1935), Cahen, Jamotte, Leperonne et Mortelmans (1946) en font l'équivalent de la fin du Beaufort moyen et du début du Beaufort supérieur d'Afrique du Sud (fin du Trias inférieur et du Trias moyen).

Dans une première note (de Saint-Seine, 1950), fondée, d'une part, sur les quelques spécimens déjà étudiés par Leriche et, de l'autre, sur de rares échantillons nouveaux récoltés jusqu'en 1949, j'avais émis des doutes sur l'âge triasique moyen de l'étage de Stanleyville et suggéré la possibilité d'un âge plus récent. Depuis cette date, une Mission du Musée du Congo belge de Tervuren m'a permis de prospecter quatre gisements de vertébrés fossiles échelonnés le long du cours du Lualaba (Congo) entre Stanleyville et Ponthierville. Les trois premiers se situent dans les argilites bitumineuses de l'étage de Stanleyville, tandis que le dernier est constitué par un calcaire en plaquettes d'âge probablement plus récent. Le premier gisement, situé sur la berge de la Mekombi, affluent de la rive gauche du Lualaba, à 840 m en amont du confluent du premier et du second, et à 50 km en amont de Stanleyville, a livré la faune suivante: *cinq ou six genres nouveaux de poissons Holo-stéens, un genre nouveau de poisson Halécostome, un crâne de*

(*) Texte remis à la séance.

(**) Cette partie reproduit presque textuellement une note présentée à l'Académie des Sciences de Paris et figurant dans les *Comptes rendus*.

Tétrapode. A l'exception d'un seul genre, tous les Holostéens présentent la particularité d'avoir un squelette axial à un stade d'évolution très avancé qui en ferait, à en juger par ce seul caractère, de véritables Halécostomes.

L'absence complète des Paléoniscoïdés (qui dominent jusqu'au Permien) et des Subholostéens (qui dominent jusqu'au Trias supérieur), d'une part, la dominance d'Holostéens passablement évolués et la présence d'un Halécostome (dont le plus ancien représentant certain est Toarcien), de l'autre, semblent permettre de conclure à un âge liasique, peut-être supérieur. Cette conclusion paraît, en outre, étayée par les faits suivants :

1° Il s'agit vraisemblablement d'une faune d'eau douce. Or on sait que les faunes de ce biotope présentent habituellement — et particulièrement au Trias (cf. Newark) — un « cachet » archaïque et « démodé » par rapport aux faunes marines contemporaines. Considérée, au contraire, comme triasique, cette faune offrirait un aspect sensiblement plus évolué que toutes les faunes marines contemporaines, ce qui paraît peu probable.

2° Plusieurs gisements, notamment celui de Saint-Gabriel, près de Stanleyville, considérés comme appartenant au même étage de Stanleyville, ont livré des fragments d'un grand *Lepidotes* nullement archaïque, et l'extension géologique connue de ce genre est Rhétien-Crétacé inférieur.

3° L'étage de Stanleyville a été considéré comme contemporain du Beaufort supérieur; or le gisement d'eau douce de Bekker's Kraal, dans le Beaufort supérieur de l'État d'Orange, a fourni, d'après Brough (1931), les Actinoptérygiens suivants : *Paléoniscoïdés*, 2 genres; *Subholostéens*, 5 genres; *Holostéens*, 0; *Halécostomes*, 0. Le « cachet » de la faune est donc beaucoup plus primitif.

4° Le gisement d'eau douce de Lutôe, dans le Karroo de l'Angola portugais, dont la belle faune n'a encore fait l'objet d'aucune monographie complète, possède au moins un Paléoniscoïdé et un Subholostéen, tandis qu'aucun genre jusqu'à présent décrit n'est commun avec l'étage de Stanleyville.

Il faut cependant attendre le dépouillement de la faune, plus abondante encore, des deux autres gisements situés dans les mêmes argilites pour énoncer une opinion ferme touchant l'âge des couches dites de Stanleyville.

II. — QUELQUES CONSÉQUENCES,

par L. CAHEN et J. LEPERSONNE.

Au cours de la mission paléontologique qu'il a effectuée pour le Musée royal du Congo belge, P. de Saint-Seine a récolté de très abondants poissons fossiles qui permettent ou, mieux, permettront, lorsque les études seront achevées, de fixer avec précision l'âge des couches de Stanleyville.

Dans la note préliminaire qui précède, P. de Saint-Seine conclut à « un âge liasique, peut-être supérieur » pour ces couches, tandis que le gisement de Songa (le dernier mentionné par l'auteur) est « d'âge probablement plus récent ». Dans ce qui suit nous ferons provisoirement abstraction de ces dernières couches qui actuellement semblent tout à fait localisées.

Pour tenir compte du rajeunissement de l'étage de Stanleyville, anciennement considéré comme Triasique ⁽¹⁾, nous passerons en revue les données d'observation et envisagerons successivement trois hypothèses.

DONNÉES D'OBSERVATION.

1. Dans la région de Stanleyville (vallées du Lomami et du Lualaba) il y a superposition d'un étage de la Loia sur un étage de Stanleyville. Les deux ensembles forment la série du Lualaba (Cahen, 1948). L'âge de l'étage inférieur donné par les poissons est Lias peut-être supérieur. Les deux étages se distinguent paléontologiquement par leurs faunes d'entomostracés,

(1) Rappelons que les arguments, basés sur des restes insuffisants de poissons fossiles, utilisés par M. Leriche, S. H. Haughton et A. C. Veatch, ont été détruits par P. de Saint-Seine. De même, les rapprochements entre les entomostracés du Congo et de l'Afrique du Sud, effectués par Haughton et Veatch, ne peuvent plus subsister à la suite des travaux de R. Marlière. A l'heure actuelle le seul fossile commun entre les séries du Lualaba et du Kwango et le Karroo supérieur d'Afrique australe est l'ostracode *Darwinula globosa* var. *stricta*. A cette exception près, les bases paléontologiques utilisées en 1946 par L. Cahen, A. Jamotte, J. Lepersonne et G. Mortelmans, pour confirmer une similitude stratigraphique-lithologique entre ces couches du Congo et le Karroo supérieur d'Afrique du Sud, tombent.

qui sont, dans l'ensemble, d'affinités triasiques (Marlière, 1950 a).

2. Dans le Sud du Congo (Kwango, Kasai, Lomami) il y a superposition d'une série du Kwango (comprenant les étages superposés de la Nsele et de l'Inzia) sur une série dite du Lualaba (Lepersonne, 1949, 1951; Mouta et Cahen, 1948; Cahen, 1951). Dans la série du Kwango, l'étage de la Nsele s'est avéré jusqu'ici pratiquement dépourvu de fossiles, l'étage inférieur de l'Inzia contient de rares restes de vertébrés et des entomostracés. Il en est de même pour la série dite du Lualaba.

Les restes de poissons, étudiés par P. de Saint-Seine (1950), ne sont pas déterminables, mais tant ceux de la série dite du Lualaba que ceux de l'étage de l'Inzia accusent des affinités jurassiques. Le gisement de Kipala (situé vraisemblablement dans la série dite du Lualaba) a livré des fragments d'un poisson rappelant *Leptolepis coryphænoïdes* du Lias supérieur. La série du Kwango contient au gîte des Falaises Schwetz des écailles de « Téléostéens d'un type inconnu, semble-t-il, avant le Jurassique », et à Kimbau, deux vertébrés d'un « poisson de type Halécostome » (donc vraisemblablement post-Toarcien) ont été découverts. Les entomostracés de ces gisements du Sud sont, comme ceux du Nord, d'affinités triasiques, à l'exception d'un seul, du sous-genre *Bairdestheria*, qui, hors du Congo, fait son apparition au Jurassique (Marlière, 1950 b).

3. Un raccord géométrique entre les couches de la région septentrionale et celles de la région méridionale a été réalisé (Delhaye et Borgniez, 1948; Cahen, 1951) : la série dite du Lualaba de la région Sud apparaît comme se raccordant à l'étage de la Loia de la série du Lualaba du Nord. Les données paléontologiques ne s'opposent pas à ce raccord et même y apportent une certaine confirmation.

HYPOTHÈSES.

A partir de ces données on peut envisager plusieurs hypothèses :

Première hypothèse. — L'âge liasique, peut-être supérieur, de l'étage de Stanleyville entraîne un âge jurassique, non seulement pour l'étage de la Loia, mais également pour la série rapportée au Lualaba et la série du Kwango au Sud du Congo.

Cette hypothèse tient compte du raccord établi et est confirmée par l'âge des poissons fossiles du Sud qui, bien que fragmentaires, sont tous jurassiques. En ce qui concerne les entomostracés, le seul phyllopoде de la série du Lualaba du Sud appartient à un genre (ou sous-genre) qui, en dehors du Congo, est jurassique; toutefois les entomostracés de la série du Kwango sont plutôt d'affinités triasiques. Cependant, la présence dans le Lualaba du Sud d'un ostracode caractéristique de l'étage de Stanleyville et d'un genre d'ostracode fréquemment trouvé dans l'étage de la Loia du Nord tend à confirmer également le raccord géométrique établi.

Cette hypothèse a donc pour elle de tenir compte du raccord établi entre les couches du Nord et celles du Sud, de l'âge indiqué par les poissons fossiles qui confirme ce raccord, de ce que les entomostracés ont également tendance à confirmer ce raccord.

Par contre, elle diminue la valeur des entomostracés et en particulier des phyllopoдеs comme indicateurs d'âge, puisque la majorité d'entre eux sont d'affinités triasiques et devraient dans ce cas monter au moins jusqu'au Liasique.

En conséquence, l'ensemble formé par les séries du Lualaba et du Kwango serait plus jeune que le Karroo supérieur d'Afrique du Sud, considéré comme se terminant au Rhétien (Du Toit, 1939).

On pourrait envisager deux variantes de cette hypothèse et considérer la série du Lualaba du Sud comme correspondant soit à l'étage de Stanleyville seul, soit à toute la série du Lualaba du Nord. Ces variantes changent peu de chose par rapport à l'hypothèse principale : la première est en contradiction avec le fait que c'est l'étage supérieur de la série qui apparaît comme transgressif. Elle pourrait facultativement entraîner une équivalence entre l'étage inférieur (de l'Inzia) de la série du Kwango et l'étage de la Loia du Nord, mais aucun élément des faunes connues n'est commun à ces deux étages. La seconde variante se heurte à moins de difficultés, mais néglige le fait que l'étage de Stanleyville paraît limité à une dépression assez locale.

Deuxième hypothèse. — Celle-ci, comme la première, maintient les raccords entre Nord et Sud, mais on admettrait que les âges indiqués par les divers groupes de fossiles devraient être quelque peu modifiés : les poissons devant être un peu vieilliss

et les entomostracés un peu rajeunis. En d'autres termes, l'âge des deux séries serait voisin du Rhétien, les groupes de poissons intéressés seraient apparus un peu plus tôt en Afrique centrale, alors que les entomostracés symptomatiques y auraient perduré un peu plus longtemps.

Cette hypothèse ne soulève aucune objection géologique à l'intérieur du Congo et permet à la rigueur de considérer les deux séries congolaises comme représentant le sommet de la série de Stormberg du Karroo sud-africain. Sur le plan paléontologique, cependant, elle paraît difficile à accepter, pour les raisons exposées plus haut par P. de Saint-Seine.

Troisième hypothèse. — Alors que la série du Lualaba du Nord est jurassique, celle du Sud et la série du Kwango seraient triasiques. Cette hypothèse implique que le raccord géométrique entre le Nord et le Sud est inexact. D'autre part, l'âge déduit des débris de poissons fossiles du Sud serait inexact, alors que celui basé sur les poissons du Nord, étudiés par le même spécialiste, serait exact. Les entomostracés du Sud seraient triasiques, alors que leurs correspondants du Nord seraient jurassiques. Or c'est précisément au Sud qu'existe le seul phyllopoде d'affinités jurassiques.

Cette hypothèse permettrait de conserver pour le Sud du bassin du Congo le raccord traditionnel avec le Karroo supérieur sud-africain.

DISCUSSION DES HYPOTHÈSES.

Ces trois hypothèses se scindent naturellement en deux groupes. L'un comprend la troisième hypothèse qui détruit le raccord géométrique et sa confirmation paléontologique, l'autre maintient ces éléments. A priori ce second groupe est donc plus probable que le premier. Sur le plan géologique, les deux hypothèses de ce groupe sont également vraisemblables et, sauf en ce qui concerne l'âge de ces formations, reçoivent la même confirmation paléontologique.

Les indications stratigraphiques fournies par un ensemble important de vertébrés fossiles en excellent état de conservation doivent cependant normalement prendre le pas sur celles déduites de l'étude des entomostracés. C'est la raison pour laquelle, de ces deux hypothèses, la première paraît la plus probable, puisqu'elle maintient sans les heurter les données

géologiques et paléontologiques, sauf en ce qui concerne les indications d'âge fournies par certains entomostracés. Mais de même que R. Marlière note (1950 *b*, p. 23) à propos d'*Estheria* (*Bairdestheria*) *kasaiensis* : « cette espèce reporte l'apparition du genre *Bairdestheria* au Trias », on peut se demander si les enseignements résultant de la coexistence dans les couches de Stanleyville, d'une faune de vertébrés du Lias (peut-être supérieur) et d'entomostracés des genres ou sous-genres *Estheriella* et *Euestheria* ne doivent pas montrer que ces genres ou sous-genres, qui jusqu'ici ne dépassaient pas le Trias, peuvent monter jusqu'au Lias au moins.

Cette hypothèse pourrait être considérée comme satisfaisante si elle ne provoquait en dehors des frontières du Congo quelques difficultés qu'il convient de brièvement examiner ici.

On sait, en effet, que la série du Kwango et peut-être aussi la série du Lualaba du Sud du Bassin du Congo se poursuivent en Angola, où, aux deux étages de la série du Kwango, correspondent respectivement la série de Lunda et l'étage supérieur de la série de Cassanje (Cassanje 3); il est possible que la série du Lualaba du Sud y soit représentée par l'étage des grès à végétaux (Cassanje 2) (Mouta et Cahen, 1948). Ces couches reposent sur l'étage des schistes à poissons (Cassanje 1), considéré comme d'âge voisin de la limite Permien-Trias (limite Beaufort inférieur-Beaufort moyen) (Teixeira, 1948).

A peu de distance au Sud, la série de la Lunda est traversée par des dolérites en dykes et en sills qui sont rapportées avec beaucoup de vraisemblance aux dolérites post-Karoo de l'Afrique du Sud (Mouta et Montenegro de Andrade, 1950). L'âge des dolérites d'Afrique du Sud est habituellement considéré comme étant le tout début du Jurassique (Du Toit, 1939); en fait on ne peut pas fixer de manière certaine l'âge de ces roches qui sont postérieures à la série de Stormberg et aux basaltes du Drakensberg et anté-Crétacé inférieur (Du Toit, 1939; Rogers, 1939).

Les géologues de l'Angola admettent, avec grande vraisemblance, que les couches qui correspondent aux séries du Lualaba et du Kwango du Sud du Congo et qui sont comprises entre le Beaufort inférieur ou moyen et les dolérites de la fin du Karoo correspondent au Beaufort supérieur et au Stormberg, avec lesquels elles offrent d'ailleurs de réelles analogies lithologiques.

C'est ainsi que la série de la Lunda et au moins l'étage de Cassanje 3, rattachés en continuité vers le Nord à des séries d'âge jurassique du Congo, seraient équivalents à des séries triasiques de l'Afrique du Sud.

Cette contradiction pourrait être résolue par l'une des deux hypothèses suivantes :

1° La série de Lunda et l'étage de Cassanje 3 au Nord du 11° parallèle Sud ne sont pas traversés par des dolérites et seraient différentes des séries traversées par les dolérites au Sud de ce parallèle. Cette hypothèse paraît contredite par le fait que du Nord au Sud, au moins la série de Lunda se suit en continuité.

2° Les dolérites seraient d'âge plus récent qu'on le pense d'habitude et seraient, par exemple, d'âge fin jurassique; la série de Lunda et l'étage de Cassanje 3 pourraient donc être d'âge jurassique; la lacune entre les schistes à poissons (Cassanje 1) et les couches susjacentes serait plus considérable que celle qui a été admise jusqu'ici.

La situation au Congo et en Angola serait donc la suivante : vers le Nord les derniers affleurements d'âge triasique certain seraient ceux des schistes à poissons de Cassanje 1, d'épaisseur fort réduite (10-12 m). L'ensemble des couches qui les surmontent, débutant par l'étage de Stanleyville non représenté dans le Sud du Congo et en Angola, ne correspondrait plus aux séries de Beaufort et de Stormberg, mais serait postérieur à ces séries. Un certain chevauchement pourrait peut-être exister du fait que le sommet des caves sandstones du Stormberg sud-africain et les basaltes qui les surmontent ne sont pas datés avec précision. Ces séries jurassiques resteraient cependant antérieures aux dolérites Karroo.

Une lacune correspondant au Trias et au Rhétien existerait au Congo belge entre la série de la Lukuga et l'étage de Stanleyville, base de la série du Lualaba.

Les séries du Lualaba et du Kwango seraient donc à comparer au « Karroo malgache » et en particulier à l'Isalo II plutôt qu'au Karroo sud-africain; à noter l'existence à Madagascar de roches éruptives posttriasiques, parmi lesquelles « d'innombrables filons de dolérites et de microgabbros » (Besairie, 1946).

RÉFÉRENCES.

- BESAIRIE, H., 1946, La géologie de Madagascar en 1946. (*Ann. Géol. Serv. Mines de Madagascar*, fasc. XII, pp. 2-28).
- BROUGH, J., 1931, On fossil fishes from the Karroo System (*Proc. Zool. Soc. London*, 1931, pp. 235-296).
- CAHEN, L., 1948, Sur la stratigraphie de la série du Lualaba le long du Lomami (*B.S.B.G.P.H.*, t. LVII, pp. 321-329).
- 1951, Données nouvelles concernant la géologie et la géomorphologie du Kasai oriental et l'origine du diamant (*A.S.G.B.*, t. XXIX, 1950-1951, pp. 106-122).
- CAHEN, L., JAMOTTE, A., LEPERSONNE, J. et MORTELMANS, G., 1946, Etat actuel des connaissances relatives à la stratigraphie des systèmes du Kalahari et du Karroo au Congo belge (*B.S.G.C.B. et R.U.*, n° 2, fasc. II, pp. 236-289).
- DELHAYE, F. et BORGNEZ, G., 1948, Contribution à la connaissance de la géologie de la région de la Lukenie et de la Tshuapa supérieure (*A.M.C.B.*, série in-8°, Sc. géol., vol. 3, pp. 7-155).
- DE SAINT-SEINE, P., 1950, Contribution à l'étude des vertébrés fossiles du Congo belge (*Ibid.*, série in-8°, Sc. géol., vol. 5, pp. 7-32).
- DU TOIT, A., 1939, *Geology of South Africa* (Londres).
- HAUGHTON, S., 1924, The fauna and stratigraphy of the Stormberg serie (*South African Mus. Ann.*, Vol. XIII, Pt 8, p. 464).
- LEPERSONNE, J., 1949, Les grands traits de la géologie du Kasai occidental et l'origine secondaire du diamant (*B.S.B.G.P.H.*, t. LVIII, pp. 284-289).
- 1951, Les subdivisions du Système du Karroo au Kwango (Congo belge) (*A.S.G.B.*, t. LXXIV, pp. B 123-139).
- LERICHE, M., 1911, Les poissons des couches du Lualaba (Congo belge) (*Rev. Zool. Afr.*, vol. 1, pp. 190-197).
- 1920, Deuxième note sur les poissons des couches du Lualaba (*Ibid.*, vol. 8, pp. 69-77).
- MARLIÈRE, R., 1948, Ostracodes et Phyllopoies du Système du Karroo au Congo belge (*A.M.C.B.*, série in-8°, Sc. géol., vol. 2, pp. 7-61).
- 1950a, Nouvelles données sur la Paléontologie du Système du Karroo en Afrique centrale (*III^e Congr. Nat. Sc. Bruxelles*, vol. 8, pp. 24-25).
- 1950b, Ostracodes et Phyllopoies du Système du Karroo au Congo belge et les régions voisines (*A.M.C.B.*, série in-8°, Sc. Géol., vol. 6, pp. 7-43).
- MOUTA, F. et CAHEN L., 1948, Le Karroo du Congo belge et de l'Angola (*Int. Geol. Congr. Report XVIIIth. Sess. London*, Pt. XIV, pp. 270-281).

- PASSAU, G., 1923, La géologie du bassin des schistes bitumineux de Stanleyville (Congo belge) [A.S.G.B., publ. rel. au Congo belge, vol. 45 (1921-1922)].
- ROGERS, A. W., 1929, in Rogers, Hall, Wagner & Haughton (*Handbuch der Regionalen Geologie. The Union of South Africa*, Heidelberg, 1929).
- TEIXEIRA, C., 1949, La faune de poissons du Karroo de l'Angola et du Congo belge (*Bol. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Lisboa*, n° 17).
- VEATCH, A. C., 1935, Evolution of the Congo Basin (*Mem. Geol. Surv. America*, n° 3).

DISCUSSION.

M. M. Sluys fait des réserves sur des synchronisations proposées à trop grande distance. Il constate qu'avec les déterminations de P. de Saint-Seine on possède maintenant un jalon sûr constitué par une faune d'âge jurassique. Cependant, ce jalon ne vaut encore que pour une région limitée tant en surface qu'en profondeur.

On peut se demander si, entre ces couches jurassiques et la série de la Lukuga d'âge permo-carbonifère, il existe quelque part au Congo des couches d'âge triasique.

On trouvera une mise au point de nos connaissances actuelles sur la question dans le travail qu'il a publié dans le Bulletin de l'Institut Royal Colonial, tome XXI (1950), pages 979 et seq., sous le titre : « Le système du Karroo dans le bassin du Congo ».
