

TH-FB11 TH-L31 4
SÉRIE A, N° 590
N° D'ORDRE
614

THÈSES

no vis Jemel.
de en col. u.
L. Néel

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

(MENTION SCIENCES)

PAR

S. MÉRIAUX

1^{re} THÈSE

Contribution à l'étude de l'Analyse granulométrique.

2^e THÈSE

Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 16 Avril 1953, devant la Commission d'Examen :

MM: BOURCART *Président.*
HOCART
RIVIÈRE } *Examineurs.*

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
7, Rue Kepler-Paris 16^e



A LA MÉMOIRE DE MON PÈRE

A MA MÈRE

A MON MARI

pour sa précieuse collaboration.

A MES ENFANTS

A Monsieur S. HÉNIN

Directeur du Laboratoire des Sols de l'Institut National
de la Recherche Agronomique

*En témoignage de vive gratitude pour
les conseils et les encouragements qu'il n'a
cessé de me donner au cours de ce travail.*

Je tiens à exprimer ici ma profonde gratitude :

- A Monsieur BOURCART, Professeur à la Sorbonne, qui a accueilli cette thèse avec un intérêt bienveillant, et m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.
- A Monsieur RIVIÈRE et Monsieur HOCART, tous deux Professeurs à la Sorbonne, qui ont bien voulu faire partie de mon jury.
- A Monsieur l'Inspecteur Général DEMOLON, Membre de l'Institut, qui m'a fait l'honneur de s'intéresser à mes travaux et d'orienter mes recherches.
- A Monsieur CIRY, Professeur de Géologie à la Faculté des Sciences de Dijon, qui a bien voulu me faire profiter de ses conseils et de son expérience.
- A Monsieur LOUIS GLANGEAUD, Doyen de la Faculté des Sciences de Besançon, qui m'a initiée aux problèmes géologiques et n'a cessé de s'intéresser à mes recherches.
- Au regretté Professeur BOUTARIC et à ses collaborateurs, qui m'ont permis d'aborder, au Laboratoire de Chimie-Physique de la Faculté des Sciences de Dijon, l'étude des suspensions argileuses.
- A mes chefs et collègues de l'Institut National de la Recherche Agronomique, et en particulier à Monsieur MATHIEU, Directeur de la Station Agronomique de Dijon, qui m'ont encouragée et aidée dans la réalisation de mes travaux.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE (1)

PAR

S. MÉRIAUX

Station agronomique de Dijon

PLAN DU MÉMOIRE

INTRODUCTION

Problèmes de l'analyse granulométrique.

- 1) dispersion
- 2) granulométrie.

But proposé : mise au point d'une technique rapide pour l'analyse en série de suspensions dont la grosseur des grains varie de 0,2 mm à 0,1 μ .

opacimétrie
densimétrie.

I. — BASES THÉORIQUES DE L'ANALYSE MÉCANIQUE PAR SÉDIMENTATION

I. — Formules de l'analyse mécanique

- 1) Formule de STOKES.
- 2) Sa validité.

II. — Formules de l'analyse mécanique continue

- 1) Signification théorique des courbes.
- 2) Interprétation de la courbe d'observation.

III. — Formules de l'analyse densimétrique

- 1) Généralités : relation ρ , pourcentage.
- 2) Signification de la densité d'une colonne biphasée en sédimentation.
- 3) Interprétation de la densité donnée par le densimètre.

- a) densité de la colonne 0.2.
- b) plan de densité moyenne.
 - α) à une profondeur empirique,
 - β) au centre de volume.

- α') CASAGRANDE.
- β') PURI.

γ) à une profondeur calculée (DAY).

4) Forme du densimètre.

- a) calcul de la profondeur effective dans le cas d'un flotteur cylindro-bicônique

- α) sans élévation de niveau
- β) avec élévation de niveau

b) Calcul du cylindre équivalent au flotteur réel.

(1) Ce travail a fait l'objet d'une thèse de doctorat d'Université soutenue le 15 avril 1953 à la Faculté des Sciences de Paris.

IV. — Formules de densité optique

- 1) Absorption lumineuse
- 2) Diffusion latérale
- 3) Graduation des appareils.

II. — ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES MÉTHODES D'ANALYSE MÉCANIQUE CONTINUE

I. — Matériel utilisé pour les recherches

- 1) Nature
- 2) Préparation
- 3) Avantages
- 4) Inconvénients.

II. — Méthodes optiques

- 1) Appareils employés
- 2) But proposé
- 3) Étude des argiles-types (variation de h avec c , variation de h avec λ).
- 4) Étude des argiles des sols (variation de h avec c , variation de h avec λ).
- 5) Essai de dosage par la densité optique en lumière transmise et diffusée
- 6) Conclusions.

III. — Méthode densimétrique

- 1) Travaux antérieurs de BOUYOUCOS
 - a) exposé
 - b) critique.
- 2) Discussion de la méthode densimétrique.
- 3) Exposé des résultats.
 - a) influence de la prise d'essai,
 - b) influence de l'agent dispersant et de sa dose,
 - c) influence de la position du densimètre,
 - d) comparaison des méthodes par immersion permanente et immersion temporaire et comparaison des différentes interprétations.
- 4) Précision de la méthode
 - a) précision de la méthode densimétrique
 - b) précision de la méthode pipette
 - c) reproductibilité de la méthode et probabilité d'erreur.
- 5) Description de la méthode.
- 6) Applications de la méthode
- 7) Conclusions.
 - a) élimination des méthodes optiques
 - b) intérêt de la méthode densimétrique.

I. — INTRODUCTION

Le but de l'analyse granulométrique est de déterminer la grandeur et la répartition des grains d'un système dispersé. Sa réalisation implique la libération préalable des granules élémentaires et la stabilisation du système biphasé (phase dispersée, phase dispersante) ainsi constitué. Deux problèmes sont donc posés par la granulométrie : la dispersion et l'analyse quantitative des particules de chaque dimension, c'est-à-dire l'évaluation du pourcentage en poids des particules classées suivant leur taille.

1° **Dispersion.** — Un matériel peut se présenter à l'état naturel sous une forme divisée : c'est par exemple le cas d'un amas de graviers qui sont indépendants les uns des autres et séparés par de l'air. Mais, la plupart du temps, les particules qui constituent un solide sont agglomérées les unes aux autres, suivant leur ordre de grandeur, soit par un ciment, soit par des charges électriques, pour donner des agrégats plus ou moins importants qu'il convient de détruire afin d'apprécier dans leur intégrité et leur totalité les éléments constitutifs. Cette désagrégation étant effectuée par des procédés mécaniques ou des agents chimiques, il faudra la conserver pour qu'elle se maintienne pendant la mesure. Nous illustrerons ce cas en considérant un sol agronomique : ce sol est formé de grains de grosseurs différentes : les plus grossiers, sables et graviers, sont unis les uns aux autres par un ciment formé des particules argileuses qui sont elles-mêmes liées entre elles par des ions. La dispersion consistera à éliminer les ions qui maintiennent les particules argileuses à l'état floculé, et à augmenter les charges de chacune de ces micelles afin de rendre maxima leurs actions répulsives mutuelles et, de cette façon, éviter une nouvelle agglomération. Nous ne nous attarderons pas sur ce problème que nous supposerons résolu, et nous envisagerons seulement dans ce travail la question de la répartition des granules d'un système dispersé stable.

2° **L'analyse granulométrique** s'effectue par des méthodes différentes suivant l'ordre de grandeur des particules du système :

a) LE TAMISAGE s'applique aux matériaux grossiers dont la gamme de dimensions peut descendre jusqu'à 0,04 mm environ, limite inférieure des mailles des tamis que l'industrie réalise actuellement.

b) Pour les particules plus fines comprises pratiquement entre 1 mm et 0,1 μ , on emploiera les déterminations microscopiques et de préférence l'*analyse mécanique*. Celle-ci est fondée sur le mouvement des particules sous l'influence d'une accélération due à la pesanteur ou à la centrifugation, au sein d'un fluide liquide ou gazeux (ventilation) immobile ou non (lévigation). Lorsque la chute a lieu dans le champ de la pesanteur, au sein d'un liquide immobile, on pratique la sédimentation qui peut être discontinue ou continue :

α) Dans la *sédimentation discontinue*, on peut séparer les différentes fractions de particules (méthode par décantations successives), ou doser les quantités d'éléments de chaque classe par des prélèvements répétés de parties aliquotes (méthode pipette).

β) La *sédimentation continue* permet d'obtenir des courbes cumulatives par la pesée directe des particules déposées (balance de SVEN ODEN) ou par la mesure d'une propriété physique des particules restant en suspension. A ce dernier groupe appartiennent les méthodes optiques et les méthodes densimétriques (appareil de WIEGNER et densimètre du type BOUYOCOS).

c) Quant aux particules de diamètre inférieur à $0,1\mu$, elles ne se sédimentent plus en suspension stable : elles appartiennent à la *colloïdologie* et requièrent des techniques sans rapport avec les précédentes et que nous n'envisagerons pas.

Ayant en vue la mise au point d'une technique rapide se prêtant à l'analyse en série de suspensions dont la grosseur des grains varie environ de $0,2\text{ mm}$ à $0,1\mu$, nous avons étudié deux techniques modernes particulièrement séduisantes par leur simplicité :

1) La méthode de BOUYOUOS qui, bien qu'empirique, a obtenu un immense succès, et qui est utilisée par les agronomes, les ingénieurs et les sédimentologistes. Nous avons cherché à donner à cette méthode, en la transformant plus ou moins, des bases scientifiques.

2) La méthode par densité optique qui, si elle était acceptable, présenterait le grand avantage du maximum de rapidité.

N. B. — Il convient de préciser que dans ces méthodes, comme dans toutes les méthodes qui utilisent la sédimentation, la valeur du rayon est inexacte puisque, comme nous aurons l'occasion de le voir plus loin, elle est déduite de la vitesse de chute par une formule arbitraire.

Nous exposerons donc, dans une première partie, les bases théoriques de l'analyse mécanique par sédimentation, et particulièrement par opacité et densimétrie. Une deuxième partie consacrée à l'étude expérimentale comprendra 3 chapitres : l'un traitant du matériel utilisé, le deuxième des procédés optiques et le troisième de la méthode densimétrique.

PREMIÈRE PARTIE

I. BASES THÉORIQUES DE L'ANALYSE MÉCANIQUE PAR SÉDIMENTATION

I. — FORMULES DE L'ANALYSE MÉCANIQUE

1° Formule de STOKES

L'analyse mécanique considérée dans sa généralité repose sur le principe physique suivant : des particules fines, au sein d'un milieu fluide, et soumises à une force constante, adoptent une vitesse limite dès que la résistance opposée par le milieu à leur chute devient égale à leur force motrice. La vitesse limite est donc fonction de la masse des particules d'une part, et de la résistance offerte par le fluide à leur mouvement d'autre part. Or, cette résistance est elle-même fonction de la vitesse de chute. Il apparaît donc que, une fois la vitesse constante acquise, il y aura

une relation entre cette vitesse et la dimension des particules. De nombreuses formules théoriques ou empiriques existent pour établir cette relation. La plus classique est celle de STOKES établie pour des particules sphériques :

une sphère tombant dans un milieu fluide subit une résistance

$$(1) \quad W = 6\pi\eta rv$$

où

$$W = \text{résistance en gr.cm/sec}^2$$

$$\eta = \text{viscosité du fluide en gr/cm.sec.}$$

$$r = \text{rayon de la sphère en cm.}$$

$$v = \text{vitesse de la sphère en cm/sec.}$$

La force motrice de la sphère est :

$$(2) \quad F = 4/3\pi r^3(\rho_s - \rho_f)g$$

$\rho_s = \text{masse spécifique de la sphère en gr/cm}^3$

$\rho_f = \text{masse spécifique du fluide en gr/cm}^3$

$g = \text{constante de gravitation} = 981 \text{ cm/sec}^2$

Cette sphère tombant avec un mouvement accéléré, il arrivera un moment où la résistance sera égale à la force motrice F. L'équilibre s'exprime par la formule suivante :

$$(3) \quad 6\pi\eta rv = 4/3\pi r^3(\rho_s - \rho_f)g$$

on peut tirer v de l'équation (3) et l'on a la formule de STOKES :

$$(4) \quad v = \frac{2r^2(\rho_s - \rho_f)g}{9\eta} = Cr^2$$

où

$$C = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_f)g}{\eta} = \text{cte de STOKES}$$

2° Validité de la formule de STOKES

Cette formule, pour être appliquée, requiert certaines conditions que nous passerons en revue brièvement, afin de voir dans quelle mesure elles sont réalisées dans la pratique de l'analyse mécanique.

a) LES PARTICULES DOIVENT ETRE SPHÉRIQUES

Or, les granules d'une suspension possèdent rarement cette forme : les matériaux des argiles par exemple ont des particules plates, hexagonales, ou en forme de bâtonnets. Comme il est difficile d'introduire des facteurs correctifs dont le calcul est pratiquement impossible, on élude la difficulté en introduisant la notion de « particules de même valeur hydraulique », c'est-à-dire de particules ayant la même vitesse de chute. Les calculs donnent le « rayon équivalent » qui est le rayon d'une sphère idéale tombant avec la même vitesse que les particules envisagées. Toutefois, lorsque

les particules sont très aplaties ou très allongées, l'application de la formule n'est plus correcte. On se rend compte immédiatement que la considération du rayon équivalent entraîne comme conséquence une densité de la sphère idéale différente de la densité réelle du solide.

b) LES MOLÉCULES DU FLUIDE DOIVENT ÊTRE PETITES
PAR RAPPORT AUX PARTICULES SOLIDES

L'analyse mécanique par sédimentation s'effectue sur des particules allant de 1 mm à $0,1\mu$, c'est-à-dire au moins 10^6 à 10^3 fois plus grande que les molécules du liquide dispersant dont les dimensions ne dépassent pas 1μ .

c) LA VITESSE DE CHUTE DOIT ÊTRE CONSTANTE

La vitesse limite, calculée d'après la formule de STOKES, est atteinte très rapidement. Le temps nécessaire à son obtention varie d'environ 5 secondes pour une particule de 2 mm à $\frac{5}{1000}$ de seconde, pour une particule de 20μ . On peut donc négliger ce temps.

d) LE FLUIDE DOIT ÊTRE D'ÉTENDUE ILLIMITÉE

parce que la paroi du récipient modifie la résistance du liquide vis-à-vis de la sphère qui tombe. D'après une formule établie par FAXEN et citée par GESSNER (1), on a démontré par le calcul que l'influence de la paroi sur la vitesse de chute des particules est encore sensible à une distance de 1 mm. Comme il est impossible de corriger cette erreur, on cherchera dans la pratique à réaliser des appareils du plus grand diamètre possible, de façon à diminuer le pourcentage d'espace influencé par l'action de la paroi.

Pour un diamètre de 5 cm, qui est un minimum, l'espace perturbé est de 4 %.

e) LES PARTICULES DOIVENT ÊTRE RIGIDES ET LISSES

Dans la pratique de l'analyse mécanique, elles sont toujours rigides puisqu'on étudie des corps solides, mais souvent elles ne sont pas lisses ; il suffit alors de faire intervenir le rayon équivalent.

f) IL NE DOIT PAS Y AVOIR DE FROTTEMENT ENTRE LES PARTICULES
ET LE LIQUIDE

Cette condition est réalisée parce que les particules sont mouillées par le liquide dispersant.

g) LA VITESSE DES PARTICULES NE DOIT PAS ETRE TROP GRANDE

La formule de STOKES établie pour de petites particules est incorrecte pour les sphères de diamètre supérieur à 200μ . On utilise pour ces dimensions la formule d'OSEEN qui s'écrit :

$$(5) \quad v = \frac{-\frac{3\eta}{2} \pm \sqrt{\frac{9\eta^2}{r^2} + 3D_2(D_1 - D_2)gr}}{\frac{9}{4} D_2}.$$

Comme l'analyse mécanique par sédimentation ne s'effectue que sur les particules de diamètre inférieur à 100μ , on n'applique pratiquement pas la correction d'OSEEN.

Il découle des conditions qui précèdent que, dans la technique courante de l'analyse mécanique, la principale cause d'inexactitude de la formule de STOKES réside dans la non-sphéricité des particules. En conséquence, le rayon calculé par cette formule sera toujours erroné, excepté si l'on se trouve en présence de particules sub-sphériques (ex. : quartz roulé), dont les dimensions ne sont pas trop faibles, de façon que la densité ne soit pas modifiée par la couche d'eau adhérente aux très fines particules.

II. — FORMULES DE L'ANALYSE MECANIQUE CONTINUE

1) Signification théorique des courbes

Le principal avantage des méthodes d'analyse continue est d'exprimer la composition mécanique d'une suspension comme une fonction continue de la grosseur de ses particules, en évitant le classement des grains en fractions arbitraires. Ces méthodes permettent d'établir des *courbes de sédimentation* donnant, en fonction du temps, soit la masse des particules déposées, soit la masse de matériel restant en suspension. A partir de ces courbes expérimentales, on peut construire des *courbes de répartition* dites aussi *de distribution* ou *de dispersion* des particules, en fonction de leurs dimensions. Ces courbes représentent, sous forme de surface, le poids des particules. L'axe des abscisses exprime le rayon des grains ou leur diamètre, ou les logarithmes de ces deux dimensions, tandis qu'en ordonnée on porte des longueurs $y = f(r)$ telles que le rectangle ayant pour hauteur y et pour base la distance correspondant à la fraction de particules comprises entre le rayon r et $r + dr$ soit proportionnel à la masse dp des particules de cette fraction. Autrement dit $f(r)$ peut être défini par la relation suivante :

$$f(r) = \frac{dp}{dr}.$$

On trace ensuite la courbe y qui limite l'aire mesurant le poids total. L'avantage des courbes de distribution ainsi établies est qu'elles caractérisent très bien les systèmes étudiés et permettent, par un simple coup d'œil, de connaître leur composition.

Les méthodes que nous avons expérimentées nous ont donné des courbes traduisant la variation avec le temps de la masse des particules restant en suspension. Nous raisonnerons donc sur ce type de courbes. Il est bien évident qu'un raisonnement analogue s'applique aux courbes qui représentent la masse des particules déposées en fonction du temps.

2) Interprétation de la courbe d'observation : (Fig. 1)

Soient :

P , le poids total au temps $t = 0$ des particules d'un système polydispersé ;

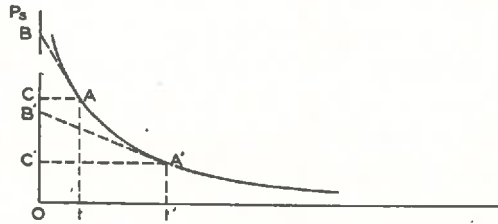


FIG. 1.

P_s , le poids des particules restant en suspension, à un temps t , dont la vitesse est inférieure à $\frac{h}{t}$, et en conséquence le rayon inférieur à $\sqrt{\frac{h}{Ct}}$ d'après la loi de STOKES

($C =$ constante de STOKES).

P_d , le poids des particules déposées, qui se décompose en

1) $P_e =$ poids des fractions entièrement déposées dont la vitesse est supérieure à $\frac{h}{t}$ et le rayon supérieur à $\sqrt{\frac{h}{Ct}}$.

2) $P_p =$ poids des particules déposées appartenant aux fractions partiellement déposées dont la vitesse est inférieure à $\frac{h}{t}$ et le rayon inférieur à $\sqrt{\frac{h}{Ct}}$.

On peut écrire que :

$$\begin{aligned} P &= P_s + P_d \\ &= P_s + P_e + P_p. \end{aligned}$$

Le calcul qui va suivre justifie l'utilisation d'une méthode simple qui permet de passer de la courbe d'observation à la courbe de distribution cherchée.

Soit p le poids des particules du système dont les rayons sont inférieurs à r , dp le poids des particules de ce même système dont le rayon est compris entre les deux valeurs voisines r et $r + dr$.

Soit p_p le poids des particules du système, partiellement déposées, au temps t , dont le rayon est inférieur à r , et dp_p le poids des particules partiellement déposées de rayon compris entre r et $r + dr$.

Si h est la hauteur de suspension au début de la sédimentation ;

V est la vitesse de chute commune à toutes les particules de rayon r , on peut écrire la relation suivante :

$$dp_p = \frac{Vt}{h} \cdot dp \quad \text{où} \quad V < \frac{h}{t}$$

qui exprime que le dépôt de l'ensemble des particules de même rayon se fait de manière permanente et uniforme. La fonction $f(r)$ correspondant à la courbe de répartition cherchée est définie, comme nous l'avons vu plus haut (p. 7) par l'égalité :

$$dp = f(r) dr,$$

d'où :

$$\begin{aligned} dp_p &= f(r) \cdot dr \cdot \frac{Vt}{h} \\ &= f(r) \cdot \frac{Cr^2t}{h} \cdot dr. \end{aligned}$$

Le poids de l'ensemble des fractions partiellement déposées au temps t est :

$$(6) \quad P_p = \frac{C}{h} \cdot t \int_0^{\sqrt{\frac{h}{Ct}}} f(r) \cdot r^2 \cdot dr,$$

la limite $\sqrt{\frac{h}{Ct}}$ correspondant au rayon maximum des fractions partiellement déposées.

Le poids de l'ensemble des fractions entièrement déposées au temps t est :

$$(7) \quad P_e = \int_{\sqrt{\frac{h}{Ct}}}^{r_m} f(r) \cdot dr,$$

la limite r_m correspondant au rayon maximum des particules de la suspension initiale.

$$(8) \quad P_d = P_p + P_e = \frac{C}{h} \cdot t \int_0^{\sqrt{\frac{h}{Ct}}} f(r) \cdot r^2 \cdot dr + \int_{\sqrt{\frac{h}{Ct}}}^{r_m} f(r) \cdot dr$$

$$(9) \quad P_s = P - P_d = P - \frac{C}{h} t \int_0^{\sqrt{\frac{h}{Ct}}} f(r) \cdot r^2 \cdot dr - \int_{\sqrt{\frac{h}{Ct}}}^{r_m} f(r) \cdot dr$$

P_s est donné par la courbe d'observation, d'où l'on peut tirer également $\frac{dP_s}{dt}$

$$(10) \left\{ \begin{aligned} \frac{dP_s}{dt} &= -\frac{C}{h} \int_0^{\sqrt{\frac{h}{Ct}}} f(r) \cdot r^2 \cdot dr - t \frac{C}{h} \cdot f\left(\sqrt{\frac{h}{Ct}}\right) \cdot \left(\sqrt{\frac{h}{Ct}}\right)^2 \cdot \frac{d\left(\sqrt{\frac{h}{Ct}}\right)}{dt} \\ &+ f\left(\sqrt{\frac{h}{Ct}}\right) \cdot \frac{d\left(\sqrt{\frac{h}{Ct}}\right)}{dt} = -\frac{C}{h} \int_0^{\sqrt{\frac{h}{Ct}}} f(r) \cdot r^2 \cdot dr. \end{aligned} \right.$$

Soit en multipliant par t :

$$(11) \quad t \cdot \frac{dP_s}{dt} = -\frac{C}{h} \cdot t \int_0^{\sqrt{\frac{h}{Ct}}} f(r) \cdot r^2 \cdot dr$$

où d'après l'équation (6)

$$(12) \quad t \cdot \frac{dP_s}{dt} = -P_p$$

Le poids P_p des fractions partiellement déposées au temps t , de rayon $< \sqrt{\frac{h}{Ct}}$ est donc égal à $-t \cdot \frac{dP_s}{dt}$, et le poids total des particules de la suspension initiale pour lesquelles $r < \sqrt{\frac{h}{Ct}}$ est : $P_s + P_p$

$$(13) \quad P_s - t \cdot \frac{dP_s}{dt} = P_s + t \cdot \left| \frac{dP_s}{dt} \right|,$$

puisque $\frac{dP_s}{dt}$ est toujours négatif.

La grandeur $P_s + t \left| \frac{dP_s}{dt} \right|$ est très simplement représentée par la longueur OB (fig. 1) sur la courbe d'observation. ($P_s = \varphi(t)$, et $t \left| \frac{dP_s}{dt} \right|$ est le produit du coefficient angulaire de la tangente à la courbe au point A par l'abscisse de ce point).

Le poids des particules dont les rayons sont compris entre r et r' est représenté par la longueur BB', obtenue en traçant les tangentes à la courbe aux points d'abscisses t et t' tels que :

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{\frac{h}{Ct}} \\ r' &= \sqrt{\frac{h}{Ct'}} \end{aligned}$$

D'où la construction de la courbe $f(r)$ par la considération des valeurs successives : $0, r_1, r_2, \dots, r_m$ obtenues par un découpage de la plage $0 - r_m$.

$\Delta r f(r)$ est donné par la lecture directe de chaque segment BB' correspondant.

La courbe cumulative peut également être tracée en portant OB en ordonnée, r en abscisse. On a d'ailleurs :

$$\frac{dP(r)}{dr} = f(r).$$

La courbe de distribution $f(r)$ pourrait être obtenue également à partir du diagramme d'observation en traçant d'abord la courbe $\frac{dP_s}{dt} = \varphi'(t)$, puis $\frac{d^2P_s}{dt^2} = \varphi''(t)$. Mais cette méthode étant plus longue que la précédente, nous ne la développerons pas.

III. — FORMULES DE L'ANALYSE DENSIMÉTRIQUE

1° Généralités

La masse spécifique ρ d'une suspension à un temps donné est égale au quotient de la masse de la suspension M par son volume V :

$$\rho = \frac{M}{V}.$$

La masse de la suspension est égale à la somme des masses des particules : M_s et du liquide dispersant : M_l . La masse du liquide s'exprime par la relation suivante :

$$M_l = \left(V - \frac{M_s}{\rho_s} \right) \cdot \rho_l$$

où ρ_l = masse spécifique du liquide
 ρ_s = masse spécifique de la phase solide.

On peut écrire :

$$(14) \quad \left\{ \begin{aligned} \rho &= \frac{\left(V - \frac{M_s}{\rho_s} \right) \cdot \rho_l + M_s}{V} \\ &= \frac{M_s(\rho_s - \rho_l)}{V \cdot \rho_s} + \rho_l. \end{aligned} \right.$$

On voit que ρ est une fonction de M_s qui peut s'écrire

$$(15) \quad \rho = aM_s + b,$$

$$\text{où} \quad \begin{aligned} a &= \frac{\rho_s - \rho_l}{V \cdot \rho_s} = \text{Cte} \\ b &= \rho_l. \end{aligned}$$

La densité d'une suspension varie donc avec la chute puisque la masse M_s des particules en suspension diminue quand la sédimentation s'effectue.

a) au temps $t = 0$, on a une densité ρ_0 égale à :

$$(16) \quad \left\{ \begin{aligned} \rho_0 &= \frac{\left(V - \frac{M_{s0}}{\rho_s}\right)\rho_l + M_{s0}}{V} \\ &= \frac{M_{s0}(\rho_s - \rho_l)}{V\rho_s} + \rho_l \\ &= aM_{s0} + b \quad \text{où } M_{s0} = \text{masse initiale des particules.} \end{aligned} \right.$$

b) Au cours de la sédimentation, on peut dire que la densité est fonction du rayon des particules, donc du temps et de la hauteur de chute :

$$\rho = f(t, h).$$

A l'instant t , et à la profondeur h , la densité $\rho_{t,h}$ est égale à :

$$(17) \quad \left\{ \begin{aligned} \rho_{t,h} &= aM_{t,h} + b \\ &= \frac{aP \cdot M_{s0}}{100} + b \quad \text{où } P = \text{pourcentage} \\ &= a'P + b \quad \text{où } a' = \frac{aM_{s0}}{100} \end{aligned} \right.$$

2° Signification de la densité d'une colonne biphasée en sédimentation

Les lois de l'hydrostatique peuvent être appliquées au cas d'un système polydispersé tant que le milieu n'est pas rigide. Elles sont donc applicables aux suspensions de concentration relativement faibles utilisées en analyse mécanique. Le densimètre est soumis à une poussée qui est égale au poids de suspension déplacée et qui est appliquée au centre de gravité du volume.

Pour CASAGRANDE (2), la poussée exercée par une suspension hétérogène sur un corps est la même que celle qui serait produite par un liquide homogène de même densité.

Soit un densimètre (fig. 2) à flotteur cylindrique de section s , de longueur l , surmonté d'une tige de diamètre négligeable. La base du flotteur se trouve à une profondeur h_2 et le sommet à une profondeur h_1 . La poussée hydrostatique F exercée par un liquide de densité ρ sur un corps de volume V est égale à :

$$F = V \cdot \rho.$$

La poussée exercée sur une section infiniment petite $s \cdot dh$ du flotteur se traduit par :

$$F = \rho s \cdot dh.$$

La poussée totale sur le densimètre est :

$$(18) \quad F = \int_{h_1}^{h_2} \rho s \cdot dh.$$

On sait que $F = V\rho = s(h_2 - h_1)\bar{\rho}$
d'où la densité moyenne $\bar{\rho}$ lue sur le densimètre est égale à :

$$(19) \quad \bar{\rho} = \frac{F}{s \cdot (h_2 - h_1)} = \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} \rho \cdot dh.$$

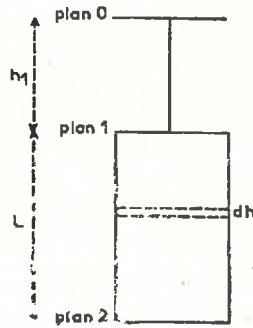


FIG. 2.

Le densimètre mesure la valeur moyenne de la densité dans la colonne qui correspond au flotteur en raison de la section uniforme du densimètre. Dans cette zone de la suspension se trouvent :

- 1) des particules dont les vitesses de chute sont comprises entre $\frac{h_2}{t}$ et $\frac{h_1}{t}$;
- 2) un certain nombre de particules de vitesse inférieure à $\frac{h_1}{t}$.

1) Il est évident que toutes les particules dont le plan initial est situé au niveau du plan 2 ou en dessous de ce plan ne sont plus dans la colonne.

a) Toutes les particules de vitesse égale à $\frac{h_2}{t}$ ne se trouvent pas dans la colonne intéressée. Certaines d'entre elles, celles qui au départ se trouvaient en dessous du plan 0 ont dépassé le plan 2.

b) Un certain nombre de particules de vitesse égale à $\frac{h_1}{t}$ qui au départ se trouvaient sur un plan X situé à une profondeur $h > h_2 - h_1$ ne sont plus dans cette colonne.

c) Pour que les particules de vitesse comprise entre $\frac{h_2}{t}$ et $\frac{h_1}{t}$ se trouvent dans la zone de suspension qui correspond au flotteur, il faut que leur plan initial soit inférieur à h_2 d'une hauteur $h > h_1$ et $h < h_2$.

2) Par contre, des particules de vitesse inférieure à $\frac{h_1}{t}$ se trouvent dans cette colonne à condition que leur point de départ ait lieu sur un plan situé à une profondeur :

- a) inférieure à h_1 d'une hauteur égale ou inférieure à vt ;
- b) inférieure à h_2 d'une hauteur égale ou supérieure à vt .

En résumé, nous pouvons dire que dans la colonne qui correspond au flotteur du densimètre, on ne trouve aucun lot complet de particules, mais seulement un certain nombre de particules des fractions dont la vitesse de chute est inférieure à $\frac{h_2}{t}$. Le tableau suivant rassemble les conditions nécessaires aux particules de chaque fraction pour qu'elles soient représentées dans la colonne (on omettra les particules qui, au départ, sont situées en-dessous du plan h_2).

| Vitesse de chute des particules | Profondeur du plan initial h |
|-------------------------------------|--|
| $v = \frac{h_2}{t}$ | $h = 0$ |
| $v = \frac{h_1}{t}$ | $0 \leq h \leq h_2 - h_1$ |
| $\frac{h_2}{t} > v > \frac{h_1}{t}$ | $0 \leq h \leq h_2 - h_1$ |
| $v < \frac{h_1}{t}$ | $\begin{cases} h \geq h_1 - vt \\ h \leq h_2 - vt \end{cases}$ |

3° Interprétation de la densité donnée par le densimètre

Le densimètre mesure, comme nous l'avons vu, la valeur moyenne de la densité de la suspension contenant les particules représentées dans le tableau. Comme le but de l'analyse mécanique est de déterminer le pourcentage des particules de chaque lot, il semble donc à première vue impossible de tirer de la densimétrie des renseignements sur la composition particulaire du matériel dispersé, puisque, ainsi que nous le savons, aucune fraction n'est représentée complètement dans la colonne. Nous nous sommes efforcés, en tenant compte des résultats de différents auteurs, de rechercher une relation entre la densité lue sur la tige du densimètre et le pourcentage des particules.

a) Un procédé qui comporte une certaine approximation consiste à envisager comme responsable de la densité TOUTE LA COLONNE 0-2 (fig. 3.) Dans cette colonne se trouvent des particules dont les vitesses sont égales ou inférieures à $\frac{h_2}{t}$. Pour avoir la densité correspondant à toutes les particules

qui possèdent cette gamme de vitesses, il convient, comme nous l'avons vu, de tracer la tangente à la courbe expérimentale densité-temps en un point d'abscisse t et d'ordonnée égale à la densité lue sur le densimètre.

Pour obtenir le pourcentage de toutes les particules de vitesse inférieure ou égale à $\frac{h_2}{t}$, il est inutile de calculer le volume V correspondant à la colonne 0-2. Ce facteur V s'élimine dans la formule du pourcentage :

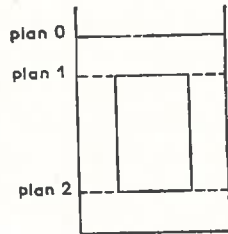


FIG. 3.

nous savons que, d'après la formule (14) qui donne la masse spécifique d'une suspension, la masse de particules s'exprime par :

$$M_s = \frac{V \cdot \rho_s(\rho - \rho_l)}{\rho_s - \rho_l}$$

le pourcentage est donné par la relation suivante :

$$P = \frac{M_s V' \cdot 100}{V \cdot x} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} V' = \text{volume total de la suspension,} \\ x = \text{masse initiale du matériel solide.} \end{array}$$

En remplaçant M_s par sa valeur, on obtient pour équation du pourcentage :

$$(20) \quad P = \frac{100V'}{x} \cdot \frac{\rho_s(\rho - \rho_l)}{\rho_s - \rho_l}$$

Par ce procédé, le problème a été fortement simplifié en ce sens que la colonne 0-1 n'est plus à éliminer. Mais les résultats sont *a priori* erronés par excès parce que l'on rend responsable de la densité la colonne 0-1. On remarquera que c'est dans cette colonne 0-1 que se trouvent les particules les plus fines, dont la masse est la plus faible. Plus le temps de sédimentation sera long, plus l'erreur due au cylindre 0-1 sera faible.

b) PLAN DE DENSITÉ MOYENNE. — Puisque la densité lue sur le densimètre correspond à la valeur moyenne de la densité dans la colonne du flotteur, on conçoit qu'il existe un plan dans cette colonne où la densité soit exactement celle qui est donnée par le densimètre. Cette notion de

« *profondeur effective* » est très féconde, parce que tout en respectant les données hydrostatiques, elle rend facile l'application de la méthode densimétrique à l'analyse mécanique. En effet, en un plan de la suspension sont représentées, avec leur concentration initiale, toutes les particules dont les vitesses de chute sont égales ou inférieures à $\frac{h}{t}$ (h étant la profondeur du plan donné). Il est aisé de calculer le diamètre maximum des particules ayant parcouru une distance h pendant une durée t . Le pourcentage de ces particules sera obtenu comme au paragraphe précédent.

Il reste à déterminer la profondeur du plan de densité moyenne.

α) Le Bureau U. S. de Public Roads situe, d'après des expériences comparatives, ce plan à une profondeur égale à $0,42 h_2$. C'est ce que nous appellerons « *la profondeur de BOUYOUCOS* » : $H_B = 0,42 (h_1 + h)$

(21) où h = hauteur du flotteur.

β) Certains auteurs font coïncider la profondeur effective avec la distance de la surface de la suspension au centre du volume du flotteur :

α') CASAGRANDE (2) considère que cette distance est assez précise pour mesurer le diamètre maximum des particules. Toutefois, comme la surface de l'éprouvette est plus grande que celle du flotteur, il y a un mouvement de la suspension dans la zone de flottation et l'auteur introduit une correction égale à $-\frac{V_1}{2S}$ où V_1 = volume du flotteur, S = surface de l'éprouvette.

La *profondeur de CASAGRANDE* s'exprime donc par :

$$(22) \quad H_0 = 0,5(h_1 + h_2) - \frac{V_1}{2S}$$

β') A. N. PURI et B. R. PURI (3) adoptent eux aussi le plan du centre de volume comme plan de densité moyenne, à condition que le flotteur soit immergé profondément. Les auteurs se fondent sur la forme de la courbe densité-profondeur (fig. 4) qui démontre que la densité varie de moins en moins rapidement, au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la surface de la suspension.

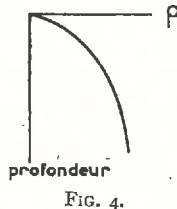


FIG. 4.

Si le flotteur est situé en profondeur et que sa hauteur soit faible par rapport à cette profondeur, A. N. PURI et B. R. PURI considèrent que l'on peut, sans grosse erreur, prendre le plan médian de la colonne de suspension correspondante comme son plan de densité moyenne.

γ) P. R. DAY (4) nie l'identification du plan de densité moyenne avec le plan du centre de volume du flotteur, en raison de la relation curviligne entre la densité et la profondeur. Il détermine de façon rigoureuse la pro-

fondeur effective lorsque la suspension est d'un type caractérisé par l'équation :

$$(23) \quad c = k \cdot \log_{10} h + b. \text{ (fig. 5)}$$

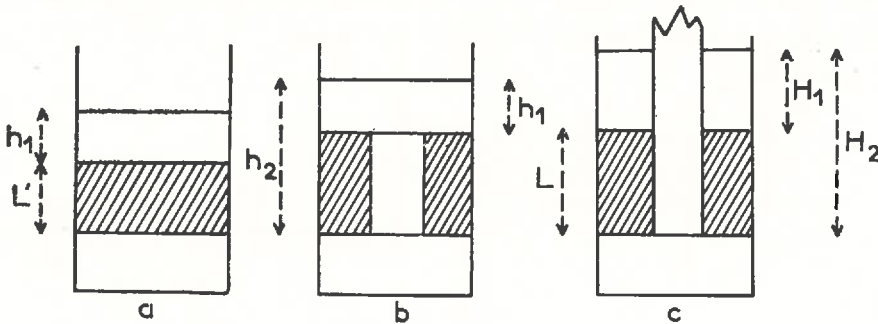


FIG. 5.

Soient : h_1 = la profondeur de la partie supérieure du flotteur
 h_2 = » » inférieure »
 L = la hauteur du flotteur,
 h_E = la profondeur effective,
 \bar{c} = la concentration moyenne,

on peut écrire que :

$$(24) \quad \bar{c} = \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} c \cdot dh.$$

En remplaçant c par sa valeur dans l'équation (23) on obtient :

$$\bar{c} = \frac{1}{h_2 - h_1} \int_{h_1}^{h_2} (k \cdot \log_{10} h + b) dh.$$

En intégrant :

$$(25) \quad \bar{c} = k \left[\frac{h_2 \cdot \log_{10} h_2 - h_1 \cdot \log_{10} h_1}{h_2 - h_1} - \log_{10} e \right] + b.$$

La profondeur effective h_E est liée à c par l'équation :

$$(26) \quad \bar{c} = k \log_{10} h_E + b.$$

En comparant (25) et (26), on peut écrire :

$$k \log_{10} h_E + b = k \left[\frac{h_2 \log_{10} h_2 - h_1 \log_{10} h_1}{h_2 - h_1} - \log_{10} e \right] + b$$

ou

$$(27) \quad \log_{10} h_E = \frac{h_2 \log_{10} h_2 - h_1 \log_{10} h_1 - \log_{10} e}{h_2 - h_1}$$

C'est la relation qui existe entre la profondeur effective et la profondeur d'immersion à condition que l'éprouvette qui contient la suspension soit très large afin que l'immersion du densimètre n'occasionne aucune élévation de niveau. Comme dans la pratique le cas est difficilement réalisable, DAV a adapté la relation précédente au cas d'un cylindre étroit de suspension.

Soient :

A : la section de l'éprouvette,

a : la section du densimètre,

L_r : la hauteur du flotteur.

La zone de mesure ou volume de suspension qui entoure le densimètre se traduit par : (fig. b)

$$L_r(A - a).$$

Avant l'introduction du densimètre, ce volume était :

L'A (fig a) où L' = hauteur du volume avant l'immersion.

On peut écrire :

$$L'A = L_r(A - a)$$

$$\frac{L_r}{L'} = \frac{A}{A - a} = \alpha = \text{grossissement linéaire vertical produit par l'introduction du flotteur.}$$

Pour simplifier le problème, l'auteur envisage hypothétiquement une tige de densimètre de même section que le flotteur, ce qui détermine un allongement vertical uniforme de la base du densimètre au sommet de la suspension (fig. 5, c). Dans ces conditions, la densité reste une fonction logarithmique continue de la profondeur de la colonne et l'équation (27) est applicable de la façon suivante :

$$(28) \quad \log_{10} H_E = \frac{H_2 \log_{10} H_2 - H_1 \log_{10} H_1}{H_2 - H_1} - \log_{10} e$$

$$\text{où} \quad h_E = \frac{H_E}{\alpha}.$$

Comme toutes les dimensions ont été multipliées par α , on obtiendra $\log_{10} h_E$ en retranchant $\log_{10} \alpha$ du 2^e membre de l'équation ci-dessus, ce qui donne en définitive :

$$(29) \quad \log_{10} h_E = \frac{H_2 \log_{10} H_2 - H_1 \log_{10} H_1}{H_2 - H_1} - \log_{10} \alpha e$$

$$\text{où} \quad \begin{aligned} H_1 &= h_1 \alpha \\ H_2 &= h_1 \alpha + L_r. \end{aligned}$$

On peut dire de façon générale que h_E se situe entre H_1 et H_2 , c'est-à-dire entre h_1 et $\left(h_1 + \frac{L_r}{\alpha}\right)$.

Conditions d'application de la formule de Day

α') Cette équation ne s'applique rigoureusement que lorsque la concentration des particules est une fonction logarithmique de la profondeur ($c = k \log_{10} h + b$), c'est-à-dire quand la distribution des particules est idéale.

β') Lorsque l'on a affaire à une suspension non idéale (fig. 6) les distri-

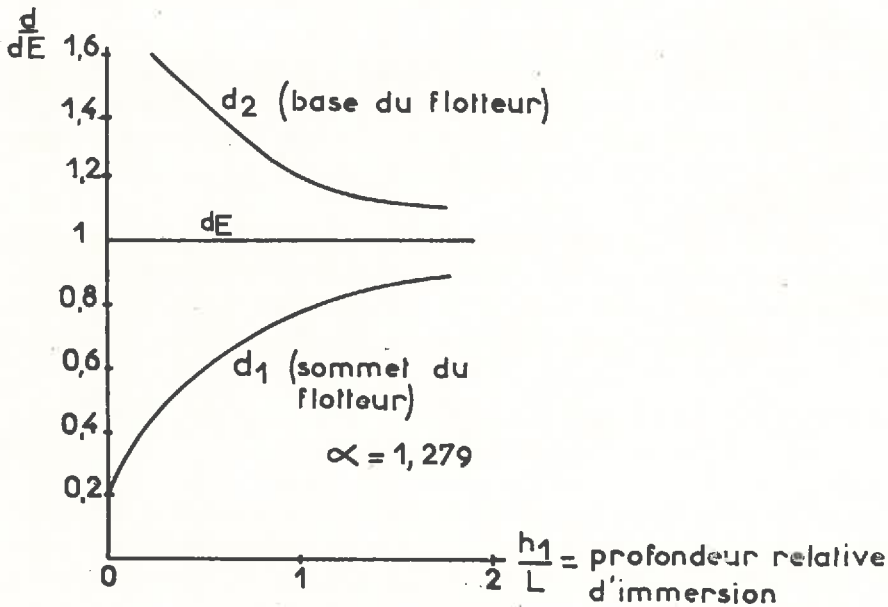


FIG. 6.

butions de particules les moins favorables seront celles pour lesquelles le plan de densité moyenne sera situé à la profondeur h_1 ou $\left(h_1 + \frac{L}{\alpha}\right)$. La valeur réelle du diamètre maximum d_m des particules du plan de densité moyenne sera comprise entre d_1 et d_2 , valeurs du diamètre aux profondeurs h_1 et $\left(h_1 + \frac{L}{\alpha}\right)$.

L'erreur maximum sur le diamètre sera donc : $\frac{d_2 - d_1}{2}$. Des distributions donnant cette erreur maximum sont rares. L'erreur sera d'autant plus faible que la profondeur d'immersion du densimètre sera plus grande. DAY a établi des courbes qui donnent les valeurs extrêmes du diamètre. D'après ces figures, on voit que l'erreur croît rapidement pour une profondeur inférieure à $h_1 = 0,5 L$. Les effets d'une répartition non idéale sont donc prévisibles. La formule s'applique sans erreur lorsque la distribution est idéale entre les diamètres d_1 et d_2 correspondant à h_1 et h_2 , c'est-à-dire

lorsque la courbe de sommation est linéaire entre ces deux dimensions. Comme ces dimensions limitent une gamme étroite, on peut dire que, dans la plupart des cas, la formule s'applique sans erreur, parce qu'une portion étroite d'une courbe de sommation peut être représentée par une ligne droite.

4° Forme du densimètre

Les calculs précédents ont été faits dans le cas d'un densimètre cylindrique. Or, dans la pratique, aucun densimètre ne possède cette forme qui produirait de graves erreurs dans la sédimentation, parce que des particules se déposeraient à la partie supérieure du cylindre et augmenteraient sa masse. De plus, la partie inférieure, par sa forme, s'opposerait au glissement, et en s'enfonçant, perturberait les particules en voie de sédimentation.

Afin de réunir les meilleures conditions possibles pour la sédimentation, nous avons été amenés à concevoir des densimètres de forme cylindro-biconiques à cônes assez élevés afin d'éviter le dépôt des particules. Nous avons cherché par le calcul à déterminer la profondeur effective dans ce cas.

a) CALCUL DE LA PROFONDEUR EFFECTIVE DANS LE CAS D'UN FLOTTEUR CYLINDRO-BIQUONIQUE

α) Cas où le niveau de la suspension ne subit pas d'élévation par immersion du densimètre. — Nous avons défini la profondeur effective h_n comme la profondeur à laquelle la densité est égale à la densité moyenne lue sur le densimètre. Dans le cas du cylindre précédemment envisagé, la densité lue représente la densité moyenne correspondant au volume du flotteur, ou en raison de la section uniforme du flotteur, la densité moyenne de la suspension dans la zone contenant le flotteur.

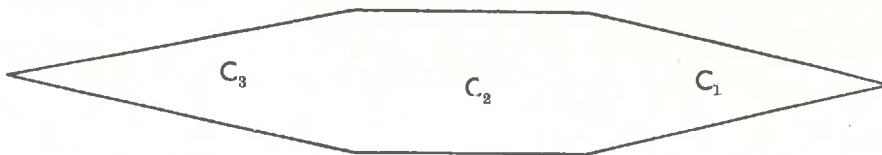


FIG. 7.

Dans le cas du cylindro-bicône, la densité lue représente seulement la densité moyenne correspondant au volume du flotteur, et non pas la densité moyenne de la suspension qui l'environne, parce que l'on n'a plus une section uniforme.

on a donc la relation :

$$\bar{c} = k \cdot \log_{10} h_n + b$$

(\bar{c} = concentration moyenne = concentration dans le plan h_n).

Le flotteur réel (fig. 7) est formé de 3 parties : 1, 2, 3 (cône 1, cylindre 2, cône 3). La poussée totale F est égale à la somme des poussées sur chacune des parties :

$$F = F_1 + F_2 + F_3.$$

Si

- c = concentration moyenne sur l'ensemble du flotteur
- \bar{c}_1 = » » sur le cône 1
- \bar{c}_2 = » » sur le cylindre 2
- \bar{c}_3 = » » sur le cône 3
- $\bar{\rho}$ = densité moyenne correspondant à tout le flotteur
- $\bar{\rho}_1$ = » » » au cône 1
- $\bar{\rho}_2$ = » » » au cylindre 2
- $\bar{\rho}_3$ = » » » au cône 3
- V = volume total du flotteur
- V_1 = » du cône 1
- V_2 = » du cylindre 2
- V_3 = » du cône 3

on peut écrire :

$$V = V_1 + V_2 + V_3.$$

La formule (14) de la page 19 donne l'expression de la masse spécifique ρ en fonction de la masse de particules M_s , de la masse spécifique des particules ρ_s et de la masse spécifique du liquide interparticulaire ρ_1 .

$$\rho = \frac{M_s(\rho_s - \rho_1)}{V\rho_s} + \rho_1$$

c est relié à M_s par l'équation:

$$c = \frac{M_s}{V}$$

d'où :

$$\bar{\rho} = \bar{c} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_s} \right) + \rho_1.$$

En appelant α l'expression $1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}$:

$$\begin{aligned} \bar{\rho} &= \alpha \bar{c} + \rho_1 \\ F &= V\bar{\rho} = V(\alpha \bar{c} + \rho_1) \\ &= V_1(\alpha \bar{c}_1 + \rho_1) + V_2(\alpha \bar{c}_2 + \rho_1) + V_3(\alpha \bar{c}_3 + \rho_1). \end{aligned}$$

D'où, compte tenu de l'équation $V = V_1 + V_2 + V_3$:

$$V\alpha \bar{c} = \sum V_i \alpha \bar{c}_i.$$

γ') *Calcul de h_{r3} .* — Nous avons affaire ici au cône inverse du cône 1. Le calcul sera le même que dans le paragraphe α' , en remplaçant h_1 par $h_2 =$ distance de la surface de la suspension à la pointe du cône, et H par : — $H' =$ hauteur du cône affecté du signe —.

On obtient donc :

$$(33) \quad \log_{10} h_{r3} = \log_{10} (h_2 - H') - \left(\frac{1}{3} + \frac{h_2}{2H'} + \frac{h_2^2}{H'^2} + \frac{h_2^3}{H'^3} L \frac{h_2 - H'}{h_2} \right) \log_{10} e$$

β) *Cas où le niveau de la suspension est élevé par immersion.* (fig. 8) — Étant donnée la section non uniforme du cylindro-bicône, la colonne de suspension (a) correspondant avant l'immersion au volume qui entoure le flotteur après l'immersion (b) ne subit pas un allongement uniforme. En conséquence, la relation logarithmique h, d qui existait avant l'immersion est

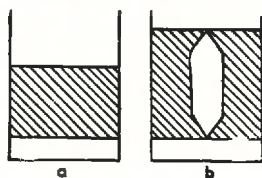


FIG. 8.

modifiée par l'introduction du densimètre et les équations précédentes ne sont plus satisfaites.

Il en découle que la formule qui permet de calculer la profondeur effective h_e dans le cas du flotteur réel cylindro-biconique ne s'applique que lorsque l'immersion est permanente, c'est-à-dire lorsque la répartition des particules de la suspension n'est pas modifiée par l'introduction du densimètre.

DAY (4) suppose qu'il provoque par immersion d'un densimètre cylindrique un allongement uniforme : sa relation h, d , tout en étant modifiée par l'élévation de niveau, reste donc théoriquement logarithmique. Mais le mélange des couches de densités différentes occasionné par l'introduction d'un flotteur qui tend à enfoncer les couches supérieures de densité plus faible, et à faire remonter les couches inférieures de densité plus élevée, modifie pratiquement sa relation logarithmique théorique. Et l'on peut vraisemblablement supposer que la formule (29) qui donne la situation du plan de profondeur effective dans le cas d'une élévation de niveau due à l'immersion n'est pas rigoureuse.

Notre étude expérimentale mettra en évidence les résultats comparatifs obtenus d'une part par immersion permanente dans le cas d'un flotteur cylindro-biconique, et d'un cylindre équivalent au précédent, d'autre part par immersion temporaire d'un flotteur cylindrique. Les chiffres obtenus permettront de vérifier ou d'infirmer la formule théorique (29) et de comparer le degré de précision de chacun des procédés.

b) CALCUL DU CYLINDRE ÉQUIVALENT AU FLOTTEUR RÉEL,
CYLINDRO-BICONIQUE

α) *Opportunité de la construction du cylindre équivalent.* — Les calculs qui permettent d'établir la position du plan de profondeur effective dans le cas d'un flotteur cylindro-biconique étant relativement longs, et la forme de ce flotteur ne se prêtant pas, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, à l'immersion temporaire, nous avons cherché, pour mieux comparer les méthodes, à remplacer en vue de l'interprétation ce flotteur par un vrai cylindre qui lui soit équivalent. En d'autres termes, nous nous sommes proposés de trouver le flotteur cylindrique qui donne la même profondeur effective que le flotteur cylindro-biconique.

Pour simplifier le problème, nous avons conservé l'identité de volume, de section, et de centre de gravité des volumes des deux flotteurs. Seule, la hauteur du cylindre équivalent reste à déterminer.

β) *Différentes fonctions de la hauteur H du cylindre équivalent.* — En vue de la détermination de la hauteur H du cylindre équivalent, nous avons construit un graphique sur lequel sont portés :

1° les courbes h_R , H d'un flotteur cylindrique pour des valeurs différentes de h_1

h_R = profondeur effective

H = hauteur du flotteur

h_1 = distance de la surface de la suspension au sommet du flotteur.

2° les courbes $h_1 + \frac{H}{2}$, H d'un cylindre, c'est-à-dire les courbes représentatives de la variation du centre de volume du cylindre en fonction de sa hauteur.

3° les points figuratifs de la profondeur effective du cylindro-bicône pour sa hauteur réelle = 19 cm, et pour des valeurs différentes de h_1 .

4° les courbes $h_R - h_1$, H d'un cylindre.

Dans les tableaux suivants se trouvent les différentes valeurs utilisées pour la construction des courbes du graphique n° 1.

TABLEAU I

Valeurs de h_R du cylindre en fonction de H et h_1

| $h_1 =$ | H = | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 6 | 6,248 | 6,494 | 6,976 | 8,374 | 10,602 | 12,751 | 14,849 |
| 8 | 8,249 | 8,495 | 8,983 | 10,400 | 12,669 | 14,862 | 17,000 |
| 10 | 10,250 | 10,471 | 10,985 | 12,415 | 14,716 | 16,941 | 19,116 |
| 12,1 | 12,329 | 12,594 | 13,077 | 14,529 | 16,851 | 19,105 | 21,310 |
| 14 | 14,250 | 14,497 | 14,989 | 16,438 | 18,768 | 21,051 | 23,278 |

TABLEAU II

Valeur de $h_1 + \frac{H}{2}$ pour $H = 20$ cm

| | | | | | |
|---------------------|----|----|----|------|----|
| h_1 | 6 | 8 | 10 | 12,1 | 14 |
| $h_1 + \frac{H}{2}$ | 16 | 18 | 20 | 22,1 | |

TABLEAU III

Valeur de h_E du cylindro-bicône en fonction de h_1 pour $H = 19$ cm

| | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| h_1 | 6 | 8 | 10 | 12,1 | 14 |
| h_E | 14,81 | 16,85 | 18,92 | 21,02 | 22,92 |

TABLEAU IV

Valeur de $h_E - h_1$ en fonction de H et h_1

| $h_1 =$ | $H =$ | | | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 6 | 0,248 | 0,494 | 0,976 | 2,384 | 4,602 | 6,751 | 8,849 |
| 8 | 0,249 | 0,495 | 0,982 | 2,400 | 4,669 | 6,862 | 9,001 |
| 10 | 0,250 | 0,471 | 0,985 | 2,415 | 4,716 | 6,941 | 9,116 |
| 12,1 | 0,229 | 0,495 | 0,977 | 2,429 | 4,751 | 7,005 | 9,210 |
| 14 | 0,250 | 0,497 | 0,983 | 2,438 | 4,768 | 7,051 | 9,278 |

La considération des courbes $h_E - h_1$ en fonction de H montre que :

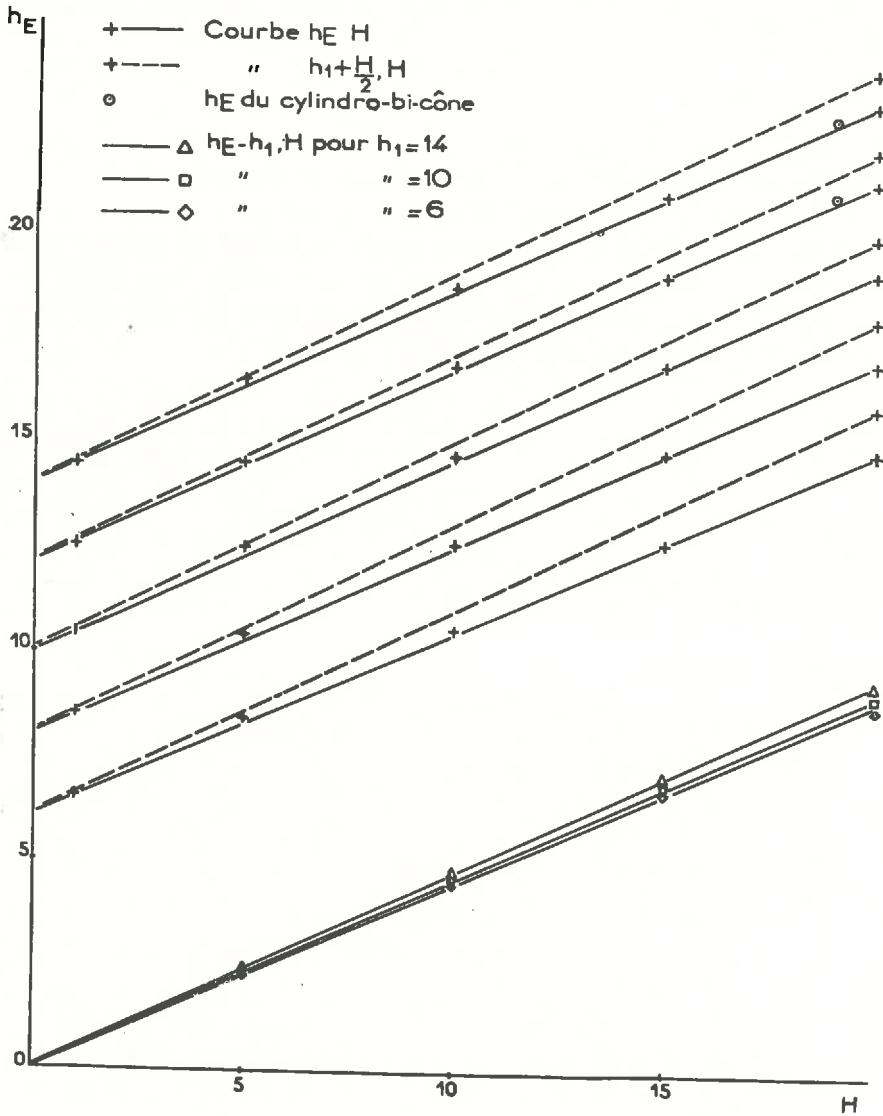
1° ces courbes sont presque des droites, c'est-à-dire que $h_E - h_1$ est toujours à peu près proportionnel à H , pour h_1 constant ;

2° ces courbes sont très voisines : quand H est constant, la variation de $h_E - h_1$ en fonction de h_1 est faible ; autrement dit, le plan de profondeur effective h_E varie peu avec la profondeur ;

3° ces courbes sont toutes situées en-dessous de la courbe $y = \frac{H}{2}$, c'est-à-dire que le plan de profondeur effective h_E est toujours un peu supérieur au plan $\frac{H}{2}$. La distance entre ces deux plans est variable, et maxima pour $h_1 = 6$ cm.

γ) Calcul de la variation de la hauteur du cylindre équivalent en fonction de h_1 . — Le centre de volume du cylindro-bicône réel dont les cotes sont les suivantes : hauteur totale = 19 cm ; hauteur du cône supérieur $C_1 = 6,5$ cm ; hauteur du cylindre $C_2 = 5$ cm ; hauteur du cône inférieur $C_3 = 7,5$ cm ; diamètre du cylindre = 3 cm ; a été calculé d'après la formule :

$$H = \frac{V_1 H_1 + V_2 H_2 + V_3 H_3}{V_1 + V_2 + V_3}$$



GRAPHIQUE I.

où $V_1, V_2, V_3 =$ volumes respectifs des parties 1, 2, 3

où $H_3, H_2, H_1 =$ distances de l'origine aux centres de volume des parties 1, 2, 3.

La distance du sommet du flotteur au centre de volume de l'ensemble est 9,21 cm.

1° $h_1 = 6$ cm.

Le centre de volume est situé à $6 + 9,21 = 15,21$ cm de la surface de la suspension $= h_M$. Pour cette valeur de h_1 , la profondeur effective h_E du cylindro-bicône est 14,81 cm. La distance $h_M - h_E = 0,4$ cm.

D'après le graphique, nous voyons que la hauteur H du cylindre pour lequel $h_E^* = 14,81$ cm et $h_M = 15,21$ cm est très voisine de 12,5 cm.

Nous avons calculé de même les hauteurs des cylindres équivalents au cylindro-bicône pour d'autres valeurs de h_1 .

2° $h_1 = 8$ cm.

Pour cette valeur :

$$h_M = 17,21 \text{ cm}$$

$$h_E = 16,85 \text{ cm (cylindro-bicône)}$$

$$h_M - h_E = 0,36 \text{ cm}$$

d'où l'on déduit : $H = 12,1 \text{ cm}$

3° $h_1 = 10$ cm.

$$h_M = 19,21 \text{ cm}$$

$$h_E = 18,92 \text{ cm (cylindro-bicône)}$$

$$h_M - h_E = 0,29 \text{ cm}$$

d'où : $H = 11,5 \text{ cm}$

4° $h_1 = 12,1$ cm

$$h_M = 21,31 \text{ cm}$$

$$h_E = 21,02 \text{ cm (cylindro-bicône)}$$

$$h_M - h_E = 0,29 \text{ cm}$$

d'où : $H = 11 \text{ cm}$

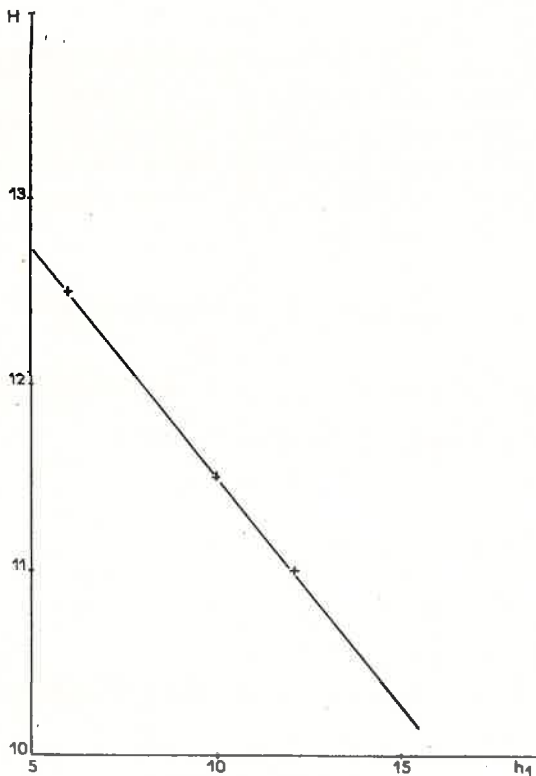
A l'aide de ces données, nous avons construit une courbe représentant la variation de H du cylindre équivalent en fonction de h_1 (graphique II).

L'on voit que plus h_1 augmente, plus H diminue.

Si nous calculons la hauteur du cylindre équivalent au cylindro-bicône, de même volume que lui, de même centre de volume et de même section, nous trouvons une valeur de $H = 10,57$ cm. Cette valeur d'après le graphique II correspond approximativement à la hauteur du cylindre véritablement équivalent au flotteur réel pour $h_1 = 14$ cm, c'est-à-dire pour une densité de 1,001. Plus h_1 diminue par rapport à 14 cm, c'est-à-

dire plus la densité s'élève, plus l'erreur faite en prenant $H = 10,57$ cm comme hauteur du cylindre équivalent est grande. L'erreur maxima sera pour $h_1 = 6$ cm, c'est-à-dire pour une densité de 1,020 qui est la densité limite des suspensions que nous utilisons dans la pratique. Cette erreur maxima est, en valeur absolue, + 0,14 ou en valeur relative + 0,95 %.

Elle est, comme on peut le constater, négligeable, puisqu'elle est inférieure à l'erreur usuelle que l'on fait dans les mesures.



GRAPHIQUE II.

On peut donc, sans atteindre la précision maxima, mais néanmoins sans faire d'erreur appréciable, utiliser comme cylindre équivalent au cylindro-bicône, le cylindre de hauteur $H = 10,57$ cm, de même section et de même centre de volume que le flotteur réel.

L'utilité pratique de l'emploi du cylindre équivalent est liée au fait que le calcul de la profondeur effective est plus simple pour un cylindre que pour un volume cylindro-biconique. Dans nos recherches expérimentales, nous aurons l'occasion de comparer ces différentes interprétations.

IV. — FORMULES DE DENSITÉ OPTIQUE

1° Absorption lumineuse

L'absorption de la lumière par un corps matériel se traduit par une diminution de l'intensité du faisceau lumineux transmis sans variation de direction. Elle est due :

- a) à des réflexions produites à l'entrée et à la sortie de la lumière ;
- b) à l'absorption par le passage de la lumière à l'intérieur de la matière. Ce phénomène, d'après l'hypothèse d'EINSTEIN, correspond à l'absorption par les molécules de quanta d'énergie des photons.

L'absorption lumineuse est un phénomène discontinu qui se produit proportionnellement au nombre de photons, c'est-à-dire à l'intensité lumineuse, et au nombre de molécules.

1) CARACTÉRISTIQUES D'ABSORPTION

Coefficient de transmission $T = \frac{I}{I_0}$. (I = intensité de la lumière transmise, I_0 = intensité de la lumière incidente).

$$\text{Opacité } W = \frac{I_0}{I} = \frac{1}{T}.$$

$$\text{Densité optique : } h = \log W = \log \frac{I_0}{I}.$$

Coefficient d'absorption : $K = \frac{I}{M} \cdot \frac{h}{d}$. ($M = 0,434$), (d = épaisseur de la tranche absorbante).

Dans nos mesures, nous utiliserons comme caractéristique la densité optique h .

2) LOI DE LAMBERT

L'intensité lumineuse diminue au fur et à mesure de la pénétration de la lumière dans un milieu absorbant, suivant la loi exponentielle de LAMBERT : si une radiation d'intensité I pénètre perpendiculairement à une tranche d'épaisseur dx de substance, on peut écrire :

$$-dI = KI \cdot dx$$

où K = facteur proportionnel à la probabilité d'activation des molécules par absorption = coefficient d'absorption

Pour une épaisseur d , on a :

$$\log_e \frac{I}{I_0} = -Kd \quad \text{ou} \quad I = I_0 e^{-Kd}$$

3) LOI DE BEER

L'absorption lumineuse est indépendante de la dilution pour une même longueur d'onde, c'est-à-dire que l'absorption est la même quand le produit de la concentration par l'épaisseur est constant.

4) LOI DE LORD RAYLEIGH

La densité optique varie dans le même sens que l'indice de réfraction n des particules, que le carré du volume v_2 de chaque particule, que le nombre N de particules par unité de volume, et en sens inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde λ .

$$h = 3 \frac{Nv^2}{\lambda^4} \cdot \frac{n^2 - n_0^2}{n^2 + 2n_0^2}$$

(n_0 = indice du liquide intermicellaire).

Si
$$B = 3Nv^2 \cdot \frac{n^2 - n_0^2}{n^2 + 2n_0^2}$$

et
$$b = \log B,$$

on peut écrire :

$$h = B\lambda^{-4}$$

ou
$$\log h = b - 4 \log \lambda$$

formule qui traduit, pour des particules sphériques et de faible dimension par rapport à la longueur d'onde, la variation de la densité optique en fonction de la longueur d'onde.

2° Diffusion latérale de la lumière

La quantité de lumière diffusée par des particules solides en suspension dans un liquide est d'autant plus grande que :

- a) les particules sont plus grosses,
- b) leur indice de réfraction diffère davantage de celui du solvant.

3° Graduation des appareils employés

- a) *Photomètre de VERNES, BRICQ et YVON* (voir fig. 9).
L'échelle de lecture est graduée directement en densité optique.
- b) *Spectrophotomètre de JOBIN et YVON* (voir fig 10).

L'absorption lumineuse due à la matière étudiée est compensée, afin d'obtenir l'égalité des plages du viseur, par l'absorption variable h d'un système de deux nicols.

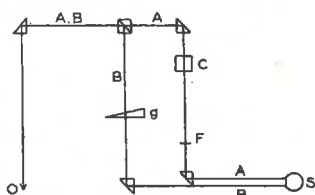


FIG. 9. — Photomètre.

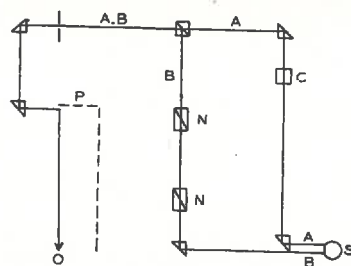


FIG. 10. — Spectrophotomètre.

Si θ = angle des sections principales des deux nicols à partir du croisement parfait pour lequel il y a extinction complète, le facteur de transmission est : $T = \sin_2^2 \theta$, l'opacité $W = \frac{I}{\sin_2^2 \theta}$, la densité optique

$$h = \log \frac{I}{\sin_2^2 \theta} = \text{colog } \sin_2^2 \theta = 2 \text{ colog } \sin \theta.$$

Une table donne les valeurs de h correspondant à θ .

DEUXIÈME PARTIE

II. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES MÉTHODES D'ANALYSE MÉCANIQUE CONTINUE

I. — MATÉRIAU UTILISÉ POUR LES RECHERCHES

I. — Nature

Nous avons employé pour nos recherches sur l'analyse mécanique des suspensions d'argiles-types et de terre tamisée au tamis de 2 mm.

1° Les ARGILES-TYPES ont été mises aimablement à notre disposition par le Muséum National d'Histoire Naturelle à qui nous exprimons nos sincères remerciements. Nous avons pu utiliser ainsi une Kaolinite des Eyzies (Dordogne), une Montmorillonite de Cadouin (Dordogne) et une Attapulgonite de Mormoiron (Vaucluse).

Ces argiles appartiennent à deux familles distinctes : les argiles phylliteuses (Kaolinite et Montmorillonite) et les argiles fibreuses (Attapulgonite).

2° LES TERRES OU LES ARGILES DES SOLS. — Ces terres ont été obtenues

nues à partir de différents sols de la Côte-d'Or par tamisage au tamis de 2 mm. Nous avons opéré sur des sols pédologiquement différents dans lesquels se trouvent représentés :

a) les sols bruns argileux :

13 *D. S. A* : sol cultivé sur alluvions modernes.

57 *D. S. A* : sol cultivé sur alluvions modernes.

Vitteaux 43 : sol cultivé sur marnes liasiques.

La Noue : sol cultivé dans la Plaine de la Saône.

b) les sols bruns argileux faiblement lessivés :

Jailly 30-45 : sol sous forêt sur limon des plateaux.

Chatillon 0,20 m : sol cultivé sur limon rouge.

Pontailier 1,20 : sol sous forêt sur alluvions modernes de la Saône.

Varanges : sol cultivé sur pliocène avec mélange probable des différents horizons.

c) les sols bruns argileux, légèrement calcaires :

Providence : sol cultivé sur limon rouge ;

d) les sols bruns argilo-calcaires :

Vitteaux 30 : sol cultivé sur marnes liasiques ;

d) les sols bruns lessivés :

Aige Henroux : sol sous forêt sur alluvions anciennes.

La Chocelle : sol sous forêt sur limons pliocènes.

Nuits 25 : sol cultivé sur limon rouge ;

f) les sols bruns siliceux acides sur roches granitiques :

Grandes Bruyères : sol sous forêt sur arène de gneiss à amphibole.

Molphey : sol sous forêt sur arène granitique ;

g) les rendzines :

Etaules : sol cultivé sur bathonien supérieur ;

h) les sols jeunes :

Spoey : sol cultivé calcaire sur alluvions modernes, pouvant être assimilé à une rendzine blanche.

Changey : sol cultivé dérivé des marnes argoviennes, peut être aussi assimilé à une rendzine blanche.

Pagny : sol cultivé, jeune, sur alluvions sableuses récentes de la Saône.

3° UN LIMON ROUGE ARGILEUX DE DAROIS.

II. — Préparation

1° les *argiles-types* ont été préparées de la façon suivante : destruction des carbonates qui pourraient s'y trouver à l'état d'impuretés, et échange des cations alcalins ou alcalino-terreux par ClH (N). Lavages à l'eau distillée pour éliminer les ions Cl^- . Agitation de deux heures dans l'eau distillée pure ou sodique N/100 suivant que l'on désire une argile H ou Na. ;

2° les *terres* ont été traitées par les méthodes utilisées à l'I. N. R. A. : après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée à 6 %, nous avons utilisé soit la méthode internationale, soit la méthode au citrate de sodium.

Par la première méthode, les carbonates de calcium sont détruits par ClH (N/5), et en même temps les ions alcalino-terreux ou alcalins sont échangés contre des ions H ; puis les ions Cl^- sont éliminés par des lavages à l'eau distillée ; la dispersion est effectuée par une agitation d'une heure en présence de NH_4OH (4 cc N par litre de suspension) ou NaOH.

La 2° méthode ne détruit pas les carbonates : trois lavages sur filtre avec ClK (N/10) permettent l'élimination des ions Ca^{++} floculants. L'agitation d'une heure se fait en présence de citrate de sodium (10 cc d'une solution normale) ou de pyrophosphate de Sodium dans les mêmes conditions.

Les suspensions ainsi obtenues par l'une ou l'autre méthode sont prêtes pour les études de granulométrie par densimétrie ou méthode pipette. Pour les méthodes optiques, nous avons opéré sur des suspensions déchargées de leurs éléments grossiers par sédimentation : soit de 8 heures sous une hauteur de 10 cm à la température de 19° pour obtenir des particules de diamètre maximum = 2μ , soit de 320 heures dans les mêmes conditions, ce qui donne des grains inférieurs à $0,33\mu$.

III. — Avantages

Nous avons affaire à un matériau bien défini dans le cas des *argiles-types* dont la structure et la forme sont maintenant établies et dont toutes les caractéristiques ont été déterminées par le Muséum d'Histoire Naturelle : analyses chimique et roentgenographique, courbes thermique et déshydratométrique.

Nos sols appartiennent eux aussi à des types pédologiques assez bien définis sur lesquels nous possédons tous les renseignements nécessaires : courbes granulométriques, pH, pourcentage de calcaire dans chaque fraction de particules, de matière organique, de Fe, de N, de K_2O et de P_2O_5 .

Nous partons donc d'éléments connus que nous possédons en stock suffisant pour être sûrs que des prises d'essais successives correspondent à la même composition chimique, minéralogique ou granulométrique. Mais malgré tout, ce matériel est loin d'être idéal.

IV. — Inconvénients

1° Nous ignorons la *nature* minéralogique des argiles contenues dans nos sols. Nous avons affaire vraisemblablement à des mélanges avec prédominance d'un type minéralogique, ou même à des structures mixtes

que l'on peut se représenter comme constituées par des feuillets élémentaires de structure différentes entre lesquels s'intercalent des ions fixés et des couches d'eau hygroscopiques (6).

De plus, dans la gamme de dimensions de l'argile, il existe du *quartz* et du *calcaire* très fins qui n'ont pas les propriétés de l'argile.

2° a) Même dans le cas des *argiles-types*, nous avons un matériau relativement hétérogène : *la forme des particules* est différente ainsi qu'on a pu l'observer au microscope électronique : l'Attapulgite se présente sous forme de fibres, tandis que la Kaolinite et la Montmorillonite sont en plaquettes pseudo-hexagonales. D'où une première erreur dans la détermination des diamètres par la loi de STOKES qui s'applique à des particules sphériques : la considération du rayon équivalent n'est pas correcte dans le cas de particules très allongées ou très aplaties. Une deuxième erreur du même type est faite en appliquant les formules de densité optique calculées elles aussi pour des particules sphériques. De plus, *la masse spécifique* de ces matériaux de types différents est fonction de l'arrangement interne de leurs molécules, de leur hydratation, et n'est pas égale à 2,65 comme on le considère habituellement. Ces différentes argiles réagissent de façon spécifique à l'apport de cations.

b) les *terres* tamisées à 2 mm sont formées de deux sortes d'éléments : les uns siliceux, passifs, inertes vis-à-vis de l'eau et des électrolytes ; les autres argileux, actifs, hydrophiles, présentant toutes les propriétés des colloïdes, ayant tendance à évoluer perpétuellement.

On voit donc que dans les deux cas le matériau est complexe et que, par là même, des facteurs peuvent l'influencer que nous ne pouvons mesurer.

II. — MÉTHODES OPTIQUES

I. — Appareils employés

Nous avons utilisé, pour notre travail, le spectrophotomètre de JOBIN et YVON et le photomètre de VERNES, BRICQ et YVON dont nous rappelons brièvement le principe (voir fig. 9 et 10) :

Deux faisceaux lumineux A et B issus d'une même source S se rejoignent et donnent dans un oculaire O deux plages lumineuses voisines, après avoir traversé : l'un A une cuve C à faces parallèles contenant la suspension à étudier, l'autre B un système de deux nicols N (spectrophotomètre) ou un coin de gélatine fumée G (photomètre), ce dispositif étant destiné à compenser l'absorption de lumière effectuée par les particules solides de la suspension. Le double faisceau émergent est, dans le cas du spectrophotomètre rigoureusement monochromatisé par passage à travers un prisme P, tandis que, pour le photomètre, une simple interposition de filtres F

donne une approximation de $50 \text{ m}\mu$ environ dans la longueur d'onde. Une échelle solidaire du coin ou des nicols permet d'obtenir la densité optique directement dans le premier cas, indirectement dans le second.

II. — But proposé

Nous avons *a priori* été séduits par l'idée d'effectuer l'analyse granulométrique continue par voie optique sans perturber la suspension. Il s'agissait là d'une mesure simple et rapide. Pour l'appliquer, il suffisait de démontrer deux points essentiels, à savoir d'une part que nos argiles obéissent à la loi de BEER (relation simple entre la densité optique et la concentration), d'autre part que la densité optique est indépendante de la nature des argiles.

III. — Etude des argiles minéralogiques

I) VARIATION DE LA DENSITÉ OPTIQUE AVEC LA CONCENTRATION

Pour résoudre ces deux problèmes, nous avons étudié à l'aide du spectrophotomètre de JOBIN et YVON, sur des suspensions acides ou sodiques de nos différentes argiles-types dont les particules ont un diamètre maximum égal à $0,9 \mu$, comment variait la densité optique avec la concentration en éléments solides, pour des longueurs d'onde variables allant de $0,5$ à $0,7 \mu$. Les résultats que nous avons obtenus pour les différentes argiles sont consignés dans les tableaux V, VI, VII où :

d = diamètre maximum des grains,

c = concentration en grammes par litre,

λ = longueur d'onde ($\text{m}\mu$)

h = densité optique

v = degré de dilution $\frac{c_0}{c}$

c_0 = concentration initiale.

Nous avons, à l'aide de ces données, tracé des courbes de variation de h en fonction de c que nous reproduisons ci-dessous (graphique III).

La valeur de H que nous donnons dans les tableaux correspond à $ht - hl$.

ht = densité optique de la cuve pleine de la suspension,

hl = densité optique de la cuve pleine de liquide intermicellaire.

(Nous avons tracé les courbes h, c seulement pour la longueur d'onde $\lambda = 600 \text{ m}\mu$). Ces courbes montrent que les trois argiles étudiées obéissent à la loi de BEER : la densité optique varie linéairement avec la concentration. Il suffit d'ailleurs, pour s'en rendre compte, d'observer la constance,

TABLEAU V. — Kaolinite

| Concentration | Référence | Cation fixé | ν/h pour $\lambda = 600$ | h pour $\lambda =$ (en $m\mu$) | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------|-------------|------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|-------|
| | | | | 500 | 540 | 550 | 560 | 580 | 600 | 640 | 650 | 660 | 700 | |
| $c = 11,7$ | mai 49 | H | 16,41 | 23,01 | 20,02 | | 19,13 | 17,73 | 16,41 | 14,12 | | | 12,93 | 11,29 |
| $c = 5,85$ | — | — | 16,98 | 12,145 | 10,50 | | 9,78 | 9,13 | 8,49 | 7,27 | | | 6,83 | 5,33 |
| $c = 2,92$ | — | — | 18,40 | 6,51 | 5,596 | | 5,14 | 4,87 | 4,60 | 3,97 | | | 3,76 | 3,17 |
| $c = 1,46$ | — | — | 18,0 | | | | | 2,39 | 2,25 | 1,94 | | | 1,77 | 1,41 |
| $c = 13,7$ | 7/II/49 | — | 19,8 | 26,30 | | 23,14 | | 19,80 | | | | | 16,50 | |
| $c = 6,85$ | — | — | 19,86 | | | 12,18 | | 9,93 | | | | | 8,51 | |
| $c = 3,42$ | — | — | 21,98 | 7,22 | | 6,3 | | 5,49 | | | | | 4,36 | |
| $c = 1,71$ | — | — | 20,56 | 3,66 | | 3,03 | | 2,57 | | | | | 2,24 | |
| $c = 1,37$ | — | — | 20,5 | 3,15 | | 2,48 | | 2,05 | | | | | 1,7 | |
| $c = 0,68$ | — | — | 20,3 | 1,49 | | 1,25 | | 1,015 | | | | | 0,87 | |
| $c = 0,34$ | — | — | 19,8 | 0,775 | | 0,604 | | 0,495 | | | | | 0,423 | |
| $c = 10,2$ | 21/II/49 | Na | 10,52 | 15,93 | | 12,80 | | 10,52 | | | | | 8,93 | 7,89 |
| $c = 5,1$ | — | — | 10,1 | 7,24 | | 6,148 | | 5,05 | | | | | 4,23 | 3,84 |
| $c = 2,55$ | — | — | 10,2 | 3,78 | | 3,024 | | 2,55 | | | | | 2,09 | 1,846 |
| $c = 1,275$ | — | — | 10,08 | 1,939 | | 1,537 | | 1,261 | | | | | 1,063 | |
| $c = 1,02$ | — | — | 9,8 | 1,437 | | 1,23 | | 0,98 | | | | | 0,85 | 0,60 |
| $c = 0,51$ | — | — | 9,54 | | | 0,588 | | 0,477 | | | | | 0,407 | 0,365 |
| $c = 0,255$ | — | — | 8,32 | 0,330 | | 0,285 | | 0,208 | | | | | 0,199 | 0,18 |

TABLEAU VI. — Montmorillonite

| Concentration | Référence | Cation fixé | $\frac{v/h}{\lambda}$ pour $\lambda = 600$ | h pour $\lambda =$ (en $m\mu$) | | | | | | | | | | |
|------------------------|-----------|-------------|--|-----------------------------------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|-------|
| | | | | 500 | 540 | 550 | 560 | 580 | 600 | 640 | 660 | 700 | | |
| $\frac{c}{1} = 16,65$ | mai 49 | H | 21,32 | | | | 24,08 | 23,16 | 21,32 | 19,64 | | | 17,92 | 14,5 |
| $\frac{c}{2} = 8,33$ | — | — | 21,94 | | | | 12,19 | 11,70 | 10,97 | 9,62 | | | 9,26 | |
| $\frac{c}{4} = 4,16$ | — | — | 22,32 | | 6,716 | | 6,27 | 5,91 | 5,58 | 4,72 | | | 4,48 | 3,74 |
| $\frac{c}{8} = 2,08$ | — | — | 23,04 | | 3,30 | | | 2,97 | 2,88 | 2,53 | | | 2,27 | 1,99 |
| $\frac{c}{16} = 1,04$ | — | — | 22,72 | | 1,62 | | 1,55 | 1,53 | 1,42 | 1,13 | | | 0,91 | 0,76 |
| $\frac{c}{32} = 0,52$ | — | — | 24 | | 0,91 | | 0,84 | 0,83 | 0,75 | 0,70 | | | 0,66 | 0,57 |
| $\frac{c}{2} = 2,22$ | 7/11/49 | H | 2,91 | 4,164 | 3,52 | | | | 2,91 | | | | 2,54 | 2,216 |
| $\frac{c}{2} = 1,11$ | — | — | 3,09 | 2,164 | 1,75 | | | | 1,548 | | | | 1,332 | 1 |
| $\frac{c}{4} = 0,55$ | — | — | 2,8 | 1,144 | 0,878 | | | | 0,706 | | | | 0,598 | 0,594 |
| $\frac{c}{8} = 0,275$ | — | — | 2,8 | 0,573 | 0,475 | | | | 0,352 | | | | 0,303 | 0,35 |
| $\frac{c}{10} = 0,228$ | — | — | 2,8 | 0,403 | 0,369 | | | | 0,284 | | | | 0,237 | 0,243 |
| $\frac{c}{20} = 0,113$ | — | — | 2,44 | 0,226 | 0,111 | | | | 0,122 | | | | 0,127 | 0,111 |
| $\frac{c}{2} = 16,1$ | 21/11/49 | Na | 12,05 | 17,31 | 14,16 | | | | 12,05 | | | | 10,43 | |
| $\frac{c}{2} = 8,05$ | — | — | 11,86 | 9,16 | 7,47 | | | | 5,93 | | | | 5,11 | 3,51 |
| $\frac{c}{4} = 4,025$ | — | — | 12,17 | 4,18 | 3,55 | | | | 3,048 | | | | 2,668 | 2,208 |
| $\frac{c}{8} = 2,01$ | — | — | 12,48 | 2,416 | 1,886 | | | | 1,560 | | | | 1,340 | 1,222 |
| $\frac{c}{10} = 1,61$ | — | — | 12,62 | | 1,560 | | | | 1,262 | | | | 1,076 | |
| $\frac{c}{20} = 0,8$ | — | — | 12,18 | 0,935 | 0,764 | | | | 0,609 | | | | 0,538 | 0,527 |
| $\frac{c}{40} = 0,4$ | — | — | 12,64 | 0,475 | 0,401 | | | | 0,316 | | | | 0,301 | 0,280 |

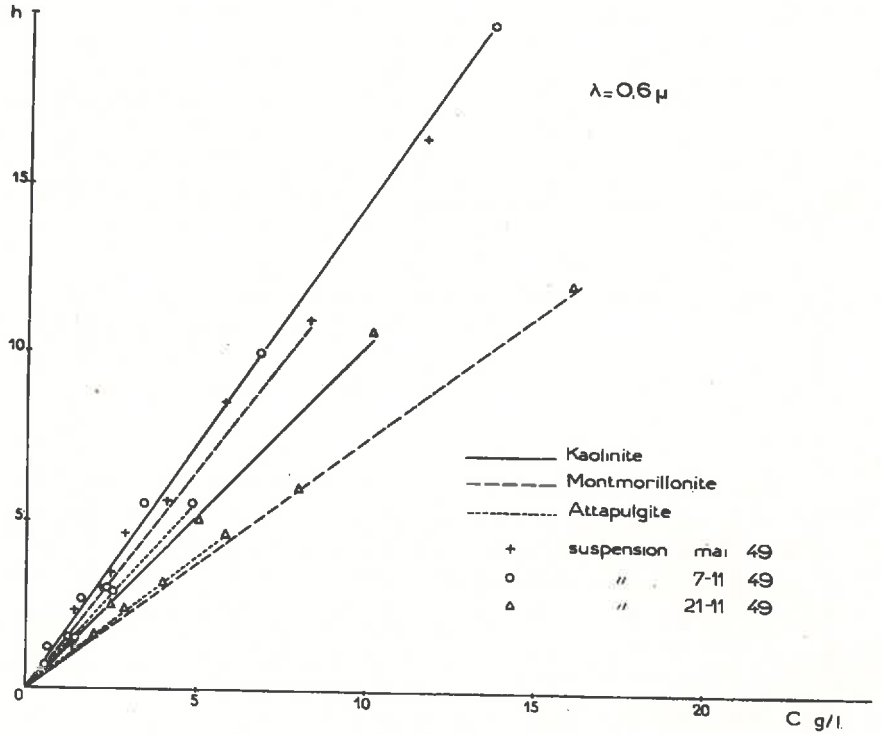
TABLEAU VII. — *Attapulgite*

| Concentration | Réfé- rence | Cation fixé | v/h pour y = 600 | h pour y = (en mμ) | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|----------------|---------------------|--------------------|-------|-----|------|------|-------|------|-------|-----|------|-------|
| | | | | 500 | 540 | 550 | 560 | 580 | 600 | 640 | 650 | 660 | 700 | |
| $c = 2,5$ | mai 49 | H | 3,34 | 4,61 | 3,89 | | 3,72 | 3,51 | 3,34 | 2,70 | | | 2,63 | 2,08 |
| $c = 1,25$ | — | — | 3,30 | 2,35 | 1,91 | | 1,78 | 1,65 | 1,50 | 1,33 | | | 1,20 | 0,99 |
| $c = 0,62$ | — | — | 3,28 | 1,19 | 0,96 | | 0,95 | 0,92 | 0,82 | 0,74 | | | 0,66 | 0,53 |
| $c = 0,31$ | — | — | 3,60 | 0,59 | 0,48 | | 0,47 | 0,45 | 0,43 | 0,37 | | | 0,34 | 0,20 |
| $c = 4,85$ | 7/11/49 | H | 5,43 | 7,87 | | | | | 5,43 | | 4,45 | | | |
| $c = 2,42$ | — | — | 5,66 | 3,67 | 3,27 | | | | 2,832 | | 2,456 | | | 1,89 |
| $c = 1,21$ | — | — | 5,92 | 1,95 | 1,63 | | | | 1,488 | | 1,166 | | | 0,95 |
| $c = 0,6$ | — | — | 5,6 | 1,07 | 0,85 | | | | 0,704 | | 0,61 | | | 0,52 |
| $c = 0,48$ | — | — | 5,88 | 0,83 | 0,71 | | | | 0,588 | | 0,50 | | | 0,42 |
| $c = 0,24$ | — | — | 5,72 | 0,41 | 0,37 | | | | 0,286 | | 0,25 | | | 0,22 |
| $c = 5,95$ | 21/11/49 | Na | 4,53 | 6,125 | 5,47 | | | | 4,53 | | 3,78 | | | 3,46 |
| $c = 2,97$ | — | — | 4,56 | 3,08 | 2,63 | | | | 2,28 | | 1,92 | | | 1,71 |
| $c = 1,49$ | — | — | 4,48 | 1,602 | 1,300 | | | | 1,128 | | 0,942 | | | 0,944 |
| $c = 0,743$ | — | — | 4,33 | 0,812 | 0,647 | | | | 0,542 | | 0,461 | | | 0,469 |
| $c = 0,595$ | — | — | 3,47 | 0,629 | 0,531 | | | | 0,347 | | 0,375 | | | 0,345 |
| $c = 0,297$ | — | — | 4,26 | 0,285 | 0,275 | | | | 0,213 | | 0,192 | | | 0,183 |

aux erreurs de mesure près, du produit $vh = \frac{c_0}{c} \cdot h$ pour les différentes argiles.

On peut conclure de ces observations que les particules des différentes argiles n'éprouvent pas de modifications sensibles au cours de la dilution.

Nous avons, pour vérifier cette étude de la dilution, opéré non pas à l'aide de fioles selon la technique habituelle, mais avec des cuves à faces parallèles. Le faisceau incident traversait la cuve contenant la suspension sous une épaisseur variable, et la cuve de 1 cm renfermant de l'eau dis-



GRAPHIQUE III.

tillée. La modification de l'épaisseur de la suspension dans la cuve à épaisseur variable faisait varier le rapport concentration/épaisseur totale de l'ensemble suspension + liquide. En retranchant de l'absorption totale du système l'absorption des deux cuves pleines d'eau, on obtenait la densité optique de la phase solide correspondant à l'épaisseur x ; cette densité optique était ramenée à la profondeur de 1 cm. Nous avons observé, ainsi que le montre le tableau VIII la constance approximative de la densité optique relative par cm. Les expériences ont porté sur l'Attapulгите H du 7/11/49 et la Montmorillonite du 7/11/49.

TABLEAU VIII

| Conditions opératoires | Attapulgite 7/11/49 | | | Montmorillonite 7/11/49 | | | | |
|----------------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 500 m μ | 520 m μ | 550 m μ | 500 m μ | 520 m μ | 550 m μ | 600 m μ | 700 m μ |
| suspension + eau distillée | | | | | | | | |
| 0,25 cm + 1 cm | 6,456 | 4,56 | 4,05 | 2,26 | 2,12 | 1,68 | 1,2 | 1,036 |
| 0,2 — + 1 — | 6,22 | 4,45 | 3,32 | 2,10 | 2,10 | 1,65 | 1 | 1,11 |
| 0,1 — + 1 — | | 4,01 | | | | | | |

2) VARIATION DE LA DENSITÉ OPTIQUE AVEC LA NATURE DE L'ARGILE

a) Fonction $h = ac$.

Le simple aspect des courbes représentatives (graph. III) des valeurs de la densité optique des trois argiles en fonction de leur concentration pour une radiation monochromatique montre que le coefficient angulaire varie avec la nature de l'argile. A concentration égale, la densité optique décroît suivant l'ordre : Kaolinite — Montmorillonite — Attapulgite. Par exemple, à la concentration de 2 gr par litre, les argiles ont une densité optique qui présente les valeurs suivantes ainsi qu'on peut le constater sur le graphique III.

| | Kaolinite | Montmorillonite | Attapulgite |
|---------------------|-----------|-----------------|-------------|
| Mai 1949 (H) | 3 | 2,7 | 2,5 |
| 7/11/49 (H) | 3,2 | 2,7 | 2,3 |
| 21/11/49 (Na) | 1,9 | 1,55 | 1,45 |

Négliger ces différences pour évaluer la concentration d'après les mesures de densité optique, revient à faire une erreur de :

- ± 20 % dans le cas des préparations acides de mai 1949,
- ± 40 % dans le cas des préparations acides du 7/11/1949,
- ± 25 % dans le cas des préparations acides du 21/11/1949.

Il apparaît donc clairement que l'on ne peut négliger pour les dosages d'argile l'action de la nature de l'argile, quelle que soit l'origine des différences observées.

Nous avons essayé d'interpréter les différences entre les valeurs de la densité optique des trois argiles par certains de leurs caractères morphologiques.

La densité optique peut s'exprimer suivant la relation :

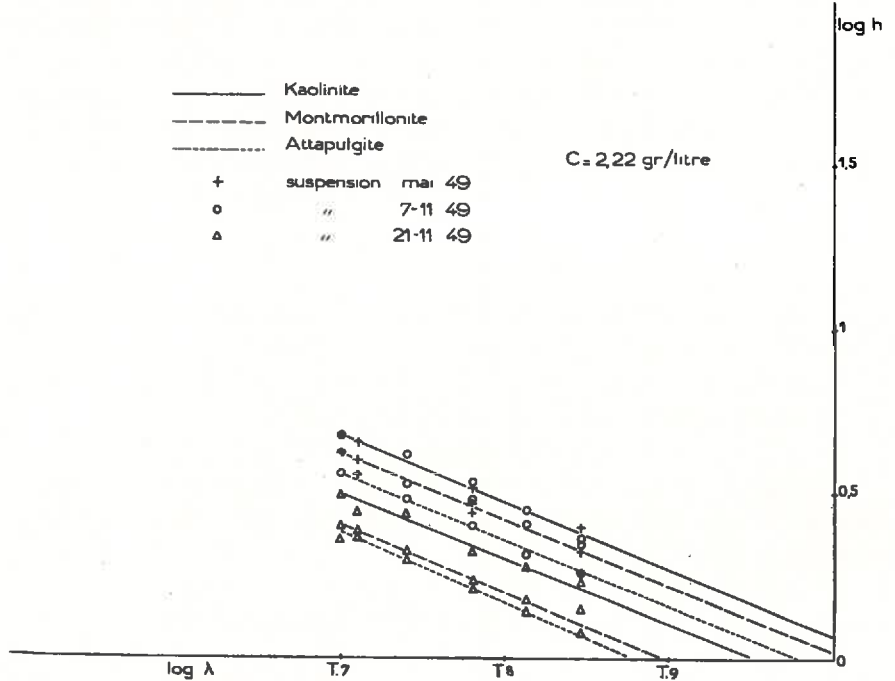
$$h = ANv^2 \frac{n^2 - n_0^2}{n^2 + 2n_0^2}$$

où :

- N = nombre de particules par unité de volume
- v = volume d'une particule
- n = indice du constituant de la particule
- n_0 = indice du liquide intermicellaire,
- A = constante dépendant de la longueur d'onde utilisée.

La Kaolinite et la Montmorillonite ayant une forme de particules assez voisine et pseudo-hexagonale, la différence de leur densité optique est peut-être due d'une part à ce que la Kaolinite est plus riche en grosses particules que la Montmorillonite (le facteur volume intervient au carré dans la formule), comme en témoigne la clarification relativement rapide de la suspension, d'autre part au fait que la Montmorillonite, par son hydratation diminue son indice de réfraction.

Quant à l'Attapulгите, il est difficile d'interpréter sa faible densité optique. Les particules ayant la forme de bâtonnets, il faudrait supposer que ces bâtonnets se présentent à la radiation incidente suivant leur plus faible surface de projection verticale. Or, les mesures de dilution qui ont mis en évidence la stabilité de la position des particules par rapport au faisceau incident, semblent peu en faveur de cette hypothèse ; il est plus vraisemblable d'admettre une répartition des particules au hasard.



GRAPHIQUE IV.

D'autre part, nous avons dans une étude sur la viscosité (7) expliqué la valeur élevée de la viscosité relative de l'Attapulгите par l'hypothèse de l'existence de paquets de micelles non dissociées dans la suspension. Si cette hypothèse correspond à la réalité, le volume de l'agrégat représenté par v intervient suivant son carré dans la formule et la densité optique est plus élevée. Donc les essais d'interprétation concernant l'Attapulгите sont vains.

b) Fonction $h = B\lambda^{-4}$.

Nous avons étudié comment variait, pour une concentration donnée, la densité optique en fonction de la longueur d'onde. D'après Lord RAYLEIGH, pour des particules sphériques de faibles dimensions par rapport à la longueur d'onde, la densité optique répond à la formule $h = B\lambda^{-4}$. BOUTARIC (5) a montré que, lorsque les particules grossissent, l'exposant diminue. Nous avons cherché à déterminer, pour chaque argile, les valeurs de B et a. Dans le tableau IX sont données, pour des concentrations de 2,22 gr

TABLEAU IX

| $h(\mu)$ $\log \lambda$ | 0,5 1,7 | 0,52 1,71 | 0,55 1,74 | 0,6 1,78 | 0,65 1,813 | 0,7 1,846 |
|-----------------------------|------------|--------------|--------------|-------------|---------------|--------------|
| <i>Préparation mai 1949</i> | | | | | | |
| Kaolinite : | | | | | | |
| h | 4,7 | 4,5 | | 3,3 | | 2,4 |
| $\log h$ | 0,67 | 0,65 | | 0,51 | | 0,38 |
| Montmorillonite : | | | | | | |
| h | 4,2 | 4 | | 3 | | 2,1 |
| $\log h$ | 0,62 | 0,60 | | 0,47 | | 0,32 |
| Attapulгите : | | | | | | |
| h | 4,1 | 3,7 | | 2,8 | | 1,8 |
| $\log h$ | 0,61 | 0,56 | | 0,44 | | 0,25 |
| <i>Préparation 7/11/49</i> | | | | | | |
| Kaolinite : | | | | | | |
| h | 4,7 | | 4,1 | 3,5 | 2,8 | 2,3 |
| $\log h$ | 0,67 | | 0,612 | 0,524 | 0,448 | 0,362 |
| Montmorillonite : | | | | | | |
| h | 4,16 | | 3,5 | 2,9 | 2,5 | 2,2 |
| $\log h$ | 0,62 | | 0,524 | 0,48 | 0,398 | 0,342 |
| Attapulгите : | | | | | | |
| h | 3,6 | | 3 | 2,5 | 2 | 1,8 |
| $\log h$ | 0,556 | | 0,476 | 0,398 | 0,301 | 0,254 |
| <i>Préparation 21/11/49</i> | | | | | | |
| Kaolinite : | | | | | | |
| h | 3,1 | 2,8 | 2,7 | 2,1 | 1,9 | 1,7 |
| $\log h$ | 0,49 | 0,44 | 0,43 | 0,32 | 0,27 | 0,23 |
| Montmorillonite : | | | | | | |
| h | 2,5 | 2,4 | 2,1 | 1,7 | 1,5 | 1,4 |
| $\log h$ | 0,39 | 0,38 | 0,32 | 0,23 | 0,17 | 0,14 |
| Attapulгите : | | | | | | |
| h | 2,3 | 2,3 | 2 | 1,6 | 1,4 | 1,2 |
| $\log h$ | 0,36 | 0,36 | 0,30 | 0,20 | 0,14 | 0,07 |

par litre, les valeurs de la densité optique h et de son logarithme $\log h$ pour des longueurs d'onde allant de 0,5 à 0,7 μ . En face de chaque longueur d'onde, nous avons porté la valeur de son logarithme, en vue de la construction des courbes $\log h$, $\log \lambda$. D'après l'allure des courbes du graphique n° IV, nous voyons que le logarithme de la densité optique décroît régulièrement quand le logarithme de la longueur d'onde augmente, suivant des droites d'équation :

$$\begin{aligned} \log h &= a \log \lambda + b \\ &= a \log \lambda + \log B. \end{aligned}$$

L'observation de ces droites montre qu'elles sont sensiblement parallèles. C'est ce que démontre le tableau X qui met en évidence la constante approximative du coefficient angulaire a .

Les valeurs de a sont très voisines. L'écart maximum entre ces valeurs est 0,23. On peut prendre comme valeur réelle la valeur moyenne $= -2,05$.

L'ordonnée à l'origine b a été calculée pour chacune de ces courbes. De chacune de ces valeurs, nous avons déduit le nombre B dont le logarithme est égal à b . Toutes ces valeurs sont également consignées dans le tableau X.

TABLEAU X

| | | Kaolinite | Montmorillonite | Attapulgitite |
|---------------|-----------|-----------|-----------------|---------------|
| Mai 1949 (H) | a | — 1,98 | — 2,05 | — 2,12 |
| | b | 0,056 | 0,005 | 1,936 |
| | B..... | 1,15 | 1,012 | 0,865 |
| 7/11/49 (H) | a | — 1,96 | — 1,96 | — 2,06 |
| | b | 0,055 | 0,005 | 1,941 |
| | B..... | 1,15 | 1,012 | 0,875 |
| 21/11/49 (Na) | a | — 2,19 | — 2,14 | — 2,13 |
| | b | 1,87 | 1,787 | 1,767 |
| | B..... | 0,75 | 0,61 | 0,58 |

En résumé, le coefficient angulaire est constant pour toutes les suspensions acides ou sodiques d'une même argile, mais l'ordonnée à l'origine est spécifique à la fois de la nature de l'argile et du cation fixé. Les équations des courbes sont les suivantes :

$$\text{Kaolinite acide : } h = 1,15\lambda^{-2,05}$$

$$\text{« sodique : } h = 0,75\lambda^{-2,05}$$

$$\text{Montmorillonite acide : } h = 1,01\lambda^{-2,05}$$

$$\text{« sodique : } h = 0,61\lambda^{-2,05}$$

$$\text{Attapulgitite acide : } h = 0,87\lambda^{-2,05}$$

$$\text{« sodique : } h = 0,58\lambda^{-2,05}$$

Nous constatons que la valeur -2 trouvée par BOUTARIC pour une argile extraite d'une terre à brique est vérifiée pour nos trois argiles-types.

IV. — Etude des argiles des sols

Nous avons utilisé les argiles extraites de deux sols, l'un calcaire (*Changey*), l'autre non calcaire (*Aige Henroux*). Pour cette dernière argile, une courbe d'analyse thermique et un cliché de R.X. que nous devons à l'obligeance du laboratoire de minéralogie du Muséum, ont montré l'existence, à côté d'hydroxydes principalement ferriques, d'un mélange de Kaolinite et d'Illite avec prédominance de celle-ci. Les particules inférieures à 2μ de *Changey* contiennent 32 % de CO_3Ca .

Nous avons primitivement extrait des deux terres les particules inférieures à 2μ . Puis une partie de ce lot a été sédimentée plus longuement, de façon à le séparer en deux fractions : l'une de 2μ à $0,80\mu$, l'autre inférieure à $0,8\mu$. Ces fractions ont été déterminées sur des suspensions acides et sodiques de chaque terre.

1° VARIATION DE LA DENSITÉ OPTIQUE AVEC LA CONCENTRATION

Nous avons, comme dans le cas précédent des argiles-types, étudié la variation de la densité optique en lumière transmise avec la concentration, pour des radiations monochromatiques allant de $0,5$ à $0,7\mu$. Les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux XI et XII, desquels on peut

TABLEAU XI
Aige-Henroux

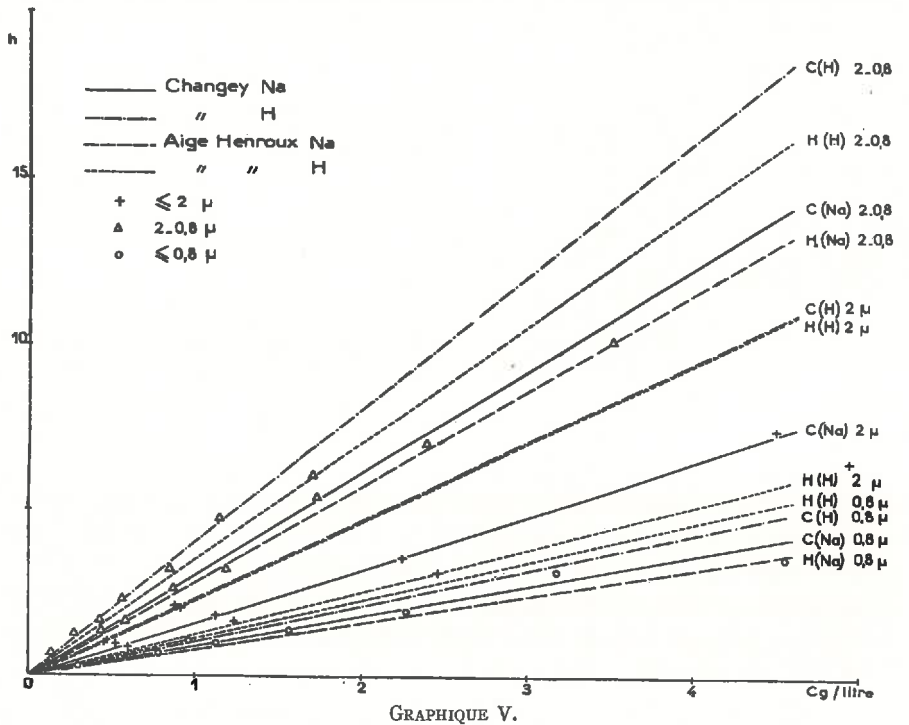
| | c | cation fixé | vh pour $\lambda =$ (en μ) | | | h pour $\lambda =$ (en μ) | | |
|--------------|----------------|-------------|-----------------------------------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|
| | | | 600 | 500 | 550 | 600 | 650 | 700 |
| 2μ | $c = 4,95$ | Na | 6,455 | 9,295 | 7,70 | 6,455 | 5,535 | 4,645 |
| | $c/2 = 2,48$ | » | 6,2 | 4,52 | 3,79 | 3,1 | 2,48 | 2,51 |
| | $c/4 = 1,24$ | » | 6,4 | 2,354 | 1,756 | 1,606 | 1,384 | 1,118 |
| | $c/8 = 0,62$ | » | 6,36 | 1,195 | 0,995 | 0,795 | 0,672 | 0,535 |
| $2 - 0,8\mu$ | $c/2 = 4,785$ | Na | 13,36 | 17,32 | 15,13 | 13,36 | 11,35 | 10,64 |
| | $c/4 = 2,392$ | » | 13,95 | 9,27 | 7,75 | 6,975 | 6,015 | 5,030 |
| | $c/8 = 1,196$ | » | 12,8 | 4,186 | 3,80 | 3,2 | 2,94 | 2,626 |
| | $c/16 = 0,598$ | » | 13,77 | 2,224 | 1,886 | 1,722 | 1,582 | 1,342 |
| $0,8\mu$ | $c = 4,57$ | Na | 3,565 | 5,945 | 4,55 | 3,565 | 2,95 | 2,515 |
| | $c/2 = 2,28$ | » | 3,8 | 3,004 | 2,246 | 1,902 | 1,54 | 1,292 |
| | $c/4 = 1,14$ | » | 3,668 | 1,502 | 1,184 | 0,917 | 0,729 | 0,634 |
| | $c/8 = 0,57$ | » | 3,816 | 0,811 | 0,622 | 0,477 | 0,375 | 0,22 |
| 2μ | $c = 0,91$ | H | 2,088 | 2,9 | 2,412 | 2,088 | 1,854 | 1,586 |
| | $c/2 = 0,455$ | H | 2,106 | 1,517 | 1,241 | 1,053 | 0,937 | 0,854 |
| | $c/4 = 0,227$ | » | 2,312 | 0,792 | 0,684 | 0,578 | 0,517 | 4,412 |
| | $c/8 = 0,114$ | » | 2,344 | 0,442 | 0,368 | 0,293 | 0,257 | 0,201 |
| $2 - 0,8\mu$ | $c = 1,7$ | H | 5,93 | 7,22 | 6,64 | 5,93 | 5,46 | 4,935 |
| | $c/2 = 0,85$ | » | 6,272 | 3,66 | 3,458 | 3,136 | 2,854 | 2,674 |
| | $c/4 = 0,425$ | » | 6,328 | 1,885 | 1,819 | 1,582 | 1,432 | |
| | $c/8 = 0,212$ | » | 6,456 | 0,989 | 0,888 | 0,807 | 0,724 | 0,677 |
| $0,8\mu$ | $c = 0,51$ | H | 0,638 | 0,998 | 0,712 | 0,638 | 0,514 | 0,430 |
| | $c/2 = 0,255$ | » | 0,616 | 0,492 | 0,414 | 0,308 | 0,249 | 0,201 |
| | $c/4 = 0,125$ | » | 0,64 | 0,292 | 0,228 | 0,160 | 0,119 | 0,081 |
| | $c/8 = 0,063$ | » | 0,68 | 0,207 | 0,152 | 0,085 | 0,087 | 0,077 |

déduire que ces argiles de sols ne sont pas modifiées par la dilution (le produit vh reste approximativement constant). A l'aide de ces données, nous avons construit les courbes h, c pour les différentes suspensions (graph. V). Les points expérimentaux se situent sur des droites comme les tableaux XI et XII le laissent supposer. Nous ne reproduirons que les courbes h, c pour $\lambda = 0,6\mu$ (graph. V).

TABLEAU XII

Changey

| diamètre | c | cation fixé | vh pour λ = | | | h pour λ = (en mμ) | | |
|-----------|--------------|-------------|-------------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
| | | | 600 | 500 | 550 | 600 | 650 | 700 |
| 2 μ | c/2 = 4,51 | Na | 7,35 | 10,75 | 8,93 | 7,35 | 6,01 | 5,35 |
| | c/4 = 2,25 | » | 7,3 | 4,97 | 4,25 | 3,515 | 3,22 | 2,655 |
| | c/8 = 1,13 | » | 6,98 | 2,454 | 2,016 | 1,746 | 1,498 | 1,302 |
| | c/16 = 0,565 | » | 6,35 | 1,160 | 0,946 | 0,794 | 0,692 | 0,587 |
| 2 μ 0,8 μ | c/4 = 3,51 | Na | 11,01 | 14,37 | 12,5 | 11,01 | 9,85 | 8,92 |
| | c/8 = 1,75 | » | 10,74 | 6,87 | 6,025 | 5,37 | 4,93 | 4,52 |
| | c/16 = 0,875 | » | 10,08 | 3,46 | 2,94 | 2,52 | 2,32 | 2,18 |
| | c/32 = 0,44 | » | 10,20 | 1,774 | 1,432 | 1,276 | 1,162 | 1,064 |
| 0,8 μ | c = 6,35 | Na | 5,99 | 7,785 | 7,20 | 5,99 | 4,95 | 4,31 |
| | c/2 = 3,18 | » | 6,38 | 4,154 | 3,126 | 3,102 | 2,388 | 2,114 |
| | c/4 = 1,59 | » | 5,38 | 2,077 | 1,697 | 1,347 | 1,127 | 0,977 |
| | c/8 = 0,80 | » | 4,85 | 1,037 | 0,824 | 0,607 | 0,537 | 0,437 |
| 2 μ | c = 1,81 | H | 4,24 | 5,10 | 4,74 | 4,24 | 3,82 | 3,48 |
| | c/2 = 0,905 | » | 4,18 | 2,66 | 2,358 | 2,092 | 1,834 | 1,650 |
| | c/4 = 0,452 | » | 3,79 | 1,295 | 1,127 | 0,949 | 0,852 | 0,722 |
| | c/8 = 0,226 | » | 3,77 | 0,664 | 0,525 | 0,472 | 0,392 | 0,380 |
| 2 μ 0,8 μ | c/4 = 1,15 | » | 4,68 | 5,745 | 5,185 | 4,68 | 4,35 | 4,035 |
| | c/8 = 0,58 | » | 4,52 | 2,92 | 2,56 | 2,26 | 2,14 | 1,640 |
| | c/16 = 0,29 | » | 4,52 | 1,450 | 1,226 | 1,130 | 0,984 | 0,876 |
| | c/32 = 0,145 | » | 4,13 | 0,710 | 0,616 | 0,517 | 0,492 | 0,401 |
| 0,8 μ | c = 0,96 | H | 1,095 | 1,750 | 1,29 | 1,095 | 0,96 | 0,7 |
| | c/2 = 0,48 | » | 1 | 0,85 | 0,82 | 0,50 | 0,406 | 0,358 |
| | c/4 = 0,24 | » | 0,948 | 0,441 | 0,321 | 0,237 | 0,183 | 0,142 |
| | c/8 = 0,12 | » | 0,952 | 0,252 | 0,181 | 0,119 | 0,099 | 0,062 |



2° VARIATION DE LA DENSITÉ OPTIQUE AVEC LA NATURE DE L'ARGILE

a) Courbe $h = ac$.

L'observation de ces courbes (graph. V) montre que les deux suspensions acides de 2μ : *Changey* et *Aige Henroux* ont exactement la même courbe : densité optique, concentration. Mais les courbes des deux fractions $2\mu - 0,8\mu$ sont différentes, celle de *Changey* étant la plus relevée, tandis que pour les fractions inférieures à $0,8\mu$, c'est la courbe d'*Aige Henroux* qui a le coefficient angulaire le plus grand. La suspension sodique de 2μ de *Changey* a une densité optique supérieure à celle de la suspension correspondante d'*Aige Henroux*. Il en est de même pour les lots $2\mu - 0,8\mu$, d'une part, et $< 0,8\mu$.

b) Courbe $h = B \lambda^{-a}$.

Nous avons étudié la variation de la densité optique avec la longueur d'onde. Les tableaux XIII et XIV reproduisent comme précédemment,

TABLEAU XIII

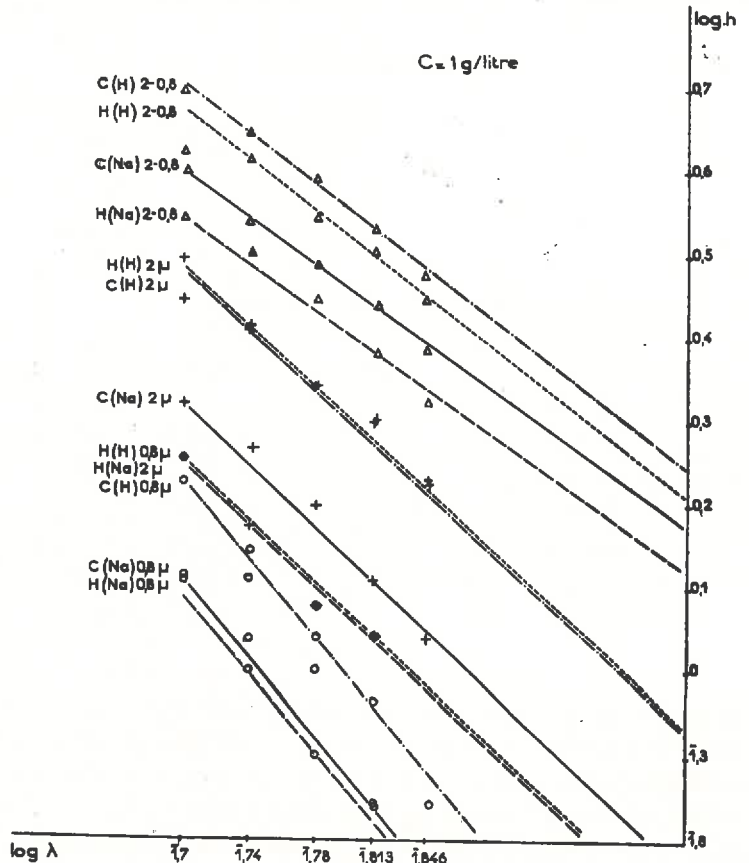
Changey

| | $\lambda = 0,5\mu$ $\log \lambda = \bar{1},7$ | $0,55\mu$ $\bar{1},74$ | $0,6\mu$ $\bar{1},78$ | $0,65\mu$ $\bar{1},813$ | $0,7\mu$ $\bar{1},846$ |
|---------------------------|--|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Changey Na < 2μ | | | | | |
| h | 2,1 | 1,9 | 1,6 | 1,3 | 1,1 |
| $\log h$ | 0,32 | 0,27 | 0,20 | 0,11 | 0,04 |
| $2 - 0,8\mu$ | | | | | |
| h | 4 | 3,5 | 3 | 2,8 | 2,5 |
| $\log h$ | 0,60 | 0,54 | 0,49 | 0,44 | 0,39 |
| < $0,8\mu$ | | | | | |
| h | 1,3 | 1,1 | 1 | 0,7 | 0,6 |
| $\log h$ | 0,11 | 0,04 | 0 | $\bar{1},84$ | $\bar{1},77$ |
| Changey H < 2μ | | | | | |
| h | 2,8 | 2,6 | 2,2 | 2 | 1,7 |
| $\log h$ | 0,447 | 0,415 | 0,342 | 0,301 | 0,23 |
| $2 - 0,8\mu$ | | | | | |
| h | 5 | 4,4 | 3,9 | 3,4 | 2,8 |
| $\log h$ | 0,699 | 0,643 | 0,591 | 0,531 | 0,447 |
| < $0,8\mu$ | | | | | |
| h | 1,7 | 1,3 | 1,1 | 0,9 | 0,7 |
| $\log h$ | 0,23 | 0,114 | 0,041 | $\bar{1},954$ | $\bar{1},845$ |

dans le cas des argiles-types mais pour des concentrations de 1 gr par litre, les valeurs de la densité optique et de son logarithme, pour des longueurs d'onde allant de $0,5$ à $0,7\mu$. A l'aide de ces données, nous avons construit les courbes représentatives de $\log h$ en fonction de $\log \lambda$ (graph. VI) pour lesquelles nous avons calculé, ainsi qu'elles sont reproduites dans le tableau XV, les valeurs de a et de B .

TABLEAU XIV
Aige d'Henroux

| $\lambda(\mu) =$ $\log \lambda =$ | 0,5 1,7 | 0,55 1,74 | 0,6 1,78 | 0,65 1,813 | 0,7 1,846 |
|--------------------------------------|------------|--------------|-------------|---------------|--------------|
| Henroux Na < 2 μ | | | | | |
| h..... | 1,8 | 1,5 | 1,2 | 1,1 | 0,9 |
| log h..... | 0,255 | 0,176 | 0,079 | 0,041 | 1,95 |
| 2-0,8 μ | | | | | |
| h..... | 3,5 | 3,2 | 2,8 | 2,4 | 2,1 |
| log h..... | 0,544 | 0,50 | 0,447 | 0,38 | 0,322 |
| < 0,8 μ | | | | | |
| h..... | 1,3 | 1 | 0,8 | 0,7 | 0,5 |
| log h..... | 0,114 | 0 | 1,903 | 1,845 | 1,699 |
| Henroux H < 2 μ | | | | | |
| h..... | 3,1 | 2,6 | 2,2 | 2 | 1,7 |
| log h..... | 0,491 | 0,415 | 0,342 | 0,301 | 0,23 |
| 2-0,8 μ | | | | | |
| h..... | 4,2 | 4,1 | 3,5 | 3,2 | 3 |
| log h..... | 0,623 | 0,613 | 0,544 | 0,505 | 0,477 |
| < 0,8 μ | | | | | |
| h..... | 1,8 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 0,9 |
| log h..... | 0,225 | 0,146 | 0,079 | 0,041 | 1,954 |



GRAPHIQUE VI.

TABLEAU XV

| | | $< 2 \mu$ | $2 \mu - 0,8 \mu$ | $< 0,8 \mu$ |
|-------------------|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Changey Na | a..... | — 1,85 | — 1,44 | — 2,41 |
| | b..... | 1,765 | 0,168 | 1,387 |
| | B..... | 0,582 | 1,472 | 0,244 |
| | | $h = 0,58\lambda^{-1,85}$ | $h = 1,47\lambda^{-1,4}$ | $h = 0,24\lambda^{-2,4}$ |
| Changey H | a..... | — 1,74 | — 1,48 | — 2,36 |
| | b..... | 1,963 | 0,255 | 1,522 |
| | B..... | 0,918 | 1,8 | 0,332 |
| | | $h = 0,92\lambda^{-1,74}$ | $h = 1,8\lambda^{-1,48}$ | $h = 0,33\lambda^{-2,36}$ |
| Aige d'Henroux Na | a.. | — 1,85 | — 1,45 | — 2,425 |
| | b.. | 1,70 | 0,109 | 1,37 |
| | B.. | 0,51 | 1,285 | 0,234 |
| | | $h = 0,51\lambda^{-1,85}$ | $h = 1,29\lambda^{-1,45}$ | $h = 0,23\lambda^{-2,4}$ |
| Aige d'Henroux H | a.. | — 1,78 | — 1,48 | — 2,2 |
| | b.. | 1,957 | 0,23 | 1,595 |
| | B.. | 0,906 | 1,691 | 0,393 |
| | | $h = 0,91\lambda^{-1,78}$ | $h = 1,7 \lambda^{-1,48}$ | $h = 0,40\lambda^{-2,2}$ |

Il découle des résultats obtenus que les valeurs de a sont réparties en trois groupes voisins de : — 1,8 — 1,45, — 2,36 correspondant chacun à un ensemble de suspensions de même grosseur de particules. Les particules les plus grosses ($2\mu - 0,8\mu$) possèdent la valeur de a la plus faible, tandis que les plus petites ($0,8\mu$) correspondent à la valeur de a la plus élevée. Les suspensions $< 2\mu$ formées de l'ensemble des deux précédentes, ont une grosseur moyenne de particules intermédiaire entre les deux autres donc la valeur de a est située entre les deux extrêmes.

Comme nous l'avons indiqué précédemment (p. 51) A. BOUTARIC pensait que lorsque les particules grossissent, l'exposant a de la formule de Lord RAYLEIGH diminue. Les résultats ci-dessus en sont une vérification.

De la même façon, les courbes sont partagées en trois faisceaux convergents correspondant chacun à une valeur du diamètre apparent des particules. A l'intérieur de chaque faisceau, les courbes sont parallèles et ne diffèrent que par les différences d'ordonnées à l'origine b . De façon générale, aussi bien pour les suspensions d'argiles minéralogiquement pures que pour ces suspensions d'argiles des terres, l'ordonnée à l'origine est plus faible pour les argiles Na que pour les argiles H de même diamètre. Ce résultat est évidemment dû à la peptisation des argiles solides.

Pour des suspensions similaires, mais de grosseurs différentes, d'une même argile, la valeur de b est d'autant plus élevée que le diamètre et par suite le carré du volume de chaque particule est plus grand : b des suspensions de $2\mu - 0,8 \mu$ est plus grand que b des suspensions $< 2\mu$ et *a fortiori* que b les suspensions $< 0,8\mu$.

Nous avons vu, au cours de l'étude des argiles types que pour des diamètres équivalents maxima égaux, l'ordonnée à l'origine b variait avec la nature de l'argile. Les argiles de *Changey* et *Aige Henroux* sont formées, en plus des hydroxydes, d'un mélange Kaolinite-Illite. Il est possible que le fractionnement granulométrique corresponde aussi à un fractionnement minéralogique, de façon que les micelles de $0,8\mu$ aient une constitution différente de celle de $2 - 0,8\mu$.

On peut noter aussi, dans les suspensions les plus grossières de *Changey*, la valeur plus élevée de b que dans les mêmes suspensions d'*Aige Henroux*. Il est possible que la Calcite de *Changey* ait une influence. Les suspensions les plus fines qui, vraisemblablement sont dépourvues de CO_3Ca , ne possèdent plus la même particularité.

En résumé, dans le cas des argiles agronomiques, la densité optique, bien que variant linéairement avec la concentration est fonction de la grosseur moyenne des particules, du cation fixé par l'argile, de la nature de l'argile pour les dimensions envisagées, et des éléments non argileux contenus dans la suspension. Là encore la méthode s'avère pratiquement impossible.

V. — Essai de dosage par la densité optique mesurée en lumière transmise et en lumière diffusée

1° ORIGINE DE CES TRAVAUX

P. DOPTER, dans un mémoire paru aux *Annales Agronomiques* (8) a essayé, sur quatre argiles, dont trois d'entre elles semblaient constitutionnellement différentes, une méthode qui élimine l'influence de la nature de l'argile. Il mesure la densité optique à des concentrations différentes, en lumière transmise (L_t), et en lumière diffusée (L_d). Il construit les courbes L_t, c . Il détermine ensuite la valeur du coefficient angulaire par son sinus en traçant un cercle trigonométrique de rayon 1 (en abscisse $c = 1 \text{ gr/l}$) en ordonnée $h = 1$). Puis il construit un autre graphique en portant en ordonnée les sinus des courbes L_t, c et en abscisse les rapports $K = \frac{\Delta d}{\Delta t}$.

(Δd = variation de la densité optique en lumière diffusée pour une dilution au moins de moitié,

Δt = variation de la densité optique en lumière transmise pour la même dilution que précédemment).

A l'aide de ces données, d'après P. DOPTER, il suffit, pour doser l'argile d'une suspension :

1° de mesurer sa densité optique L_t en lumière transmise et L_d en lumière diffusée, à une concentration c ,

2° de répéter ces mesures à une concentration au moins de moitié : L'_t et L'_d ,

3° de calculer le rapport $K = \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{L't - L't'}{L'd - L'd'}$ et de rechercher sur le graphique sinus α , K la valeur de sinus α correspondante,

4° de construire la courbe $L't, c$ à l'aide de sinus α et du cercle trigonométrique. Connaissant $L't$, on en déduit c .

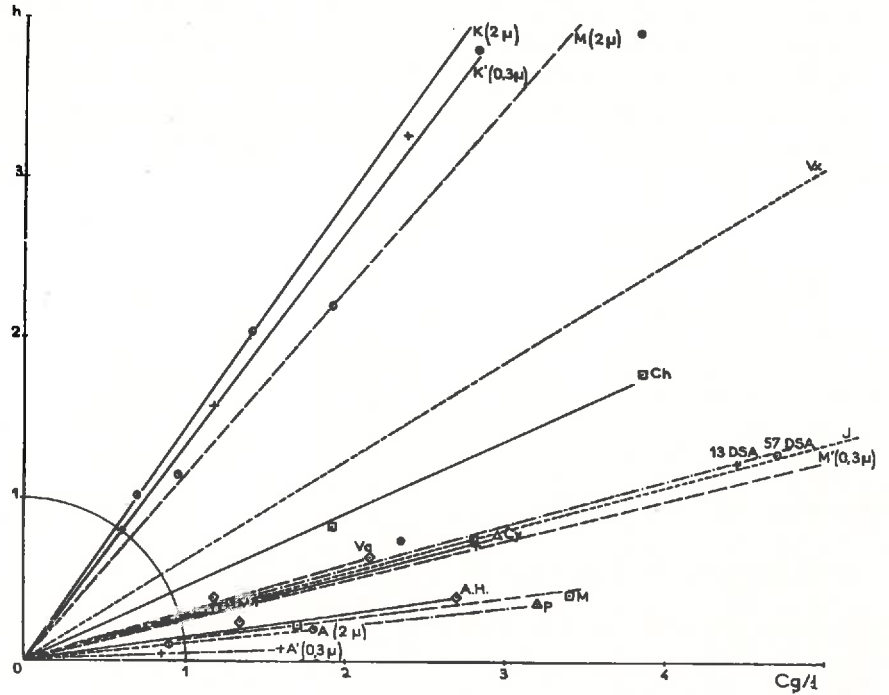
2° EXPÉRIENCES EFFECTUÉES

Nous avons voulu appliquer la méthode de DOPTER à un certain nombre d'argiles. Nous avons utilisé des suspensions d'argiles pures (Kaolinite, Attapulгите et Montmorillonite) de 2μ d'une part et de $0,326\mu$ d'autre part et des suspensions de 10 argiles de sols de $0,326\mu$. Les mesures ont été faites avec le photomètre de VERNES, BRICQ et YVON. Nous avons utilisé l'écran rouge WRATTEN α et petit diaphragme pour la lumière transmise et l'écran rouge WRATTEN F et grand diaphragme pour la lumière diffusée.

TABLEAU XVI

| Échantillons | $\frac{c}{g/litre}$ | h |
|----------------------------|--|--------------------------------|
| Molphey | $c = 3,4$ $c/2 = 1,7$ $c/4 = 0,85$ | $h = 0,41$ $0,23$ $0,16$ |
| Pagny | $c = 3,2$ $c/2 = 1,6$ $c/4 = 0,8$ | $h = 0,37$ $0,19$ $0,11$ |
| Chatillon | $c = 7,7$ $c/2 = 3,85$ $c/4 = 1,92$ | $h = 3,89$ $1,81$ $0,85$ |
| Aige Henroux | $c = 5,4$ $c/2 = 2,7$ $c/4 = 1,35$ | $h = 0,72$ $0,39$ $0,24$ |
| 13 D. S. A..... | $c = 8,9$ $c/2 = 4,45$ $c/4 = 2,22$ | $h = 2,46$ $1,23$ $0,71$ |
| 57 D. S. A..... | $c = 9,4$ $c/2 = 4,7$ $c/4 = 2,35$ | $h = 2,44$ $1,30$ $0,75$ |
| Jailly | $c = 11,2$ $c/2 = 5,6$ $c/4 = 2,8$ | $h = 2,29$ $1,19$ $0,76$ |
| Changey | $c = 5,9$ $c/2 = 2,95$ $c/4 = 1,47$ | $h = 1,40$ $0,79$ $0,55$ |
| Varanges | $c = 4,3$ $c/2 = 2,15$ $c/4 = 1,08$ | $h = 1,11$ $0,65$ $0,38$ |
| Vitteaux 43 | $c = 6$ $c/4 = 1,5$ | $h = 3,62$ $0,50$ |
| Attapulгите $0,326\mu$ | $c = 1,7$ $c/2 = 0,85$ $c/4 = 0,43$ | $h = 0,07$ $0,04$ $0,02$ |
| Montmorillonite $0,326\mu$ | $c = 5,85$ $c/2 = 2,92$ $c/4 = 1,46$ | $1,45$ $0,72$ $0,36$ |
| Kaolinite $0,326\mu$ | $c/10 = 2,38$ $c/20 = 1,19$ $c/40 = 0,6$ | $3,27$ $1,58$ $0,79$ |

| Échantillon | c g/litre | h |
|---------------------------|--------------|------|
| Attapulgite 2 μ . | c = 1,8 | 0,21 |
| | c/2 = 0,9 | 0,11 |
| | c/4 = 0,45 | 0,02 |
| Montmorillonite 2 μ . | c = 3,85 | 3,94 |
| | c/4 = 1,92 | 2,22 |
| | c/8 = 0,96 | 1,16 |
| Kaolinite 2 μ . | c/8 = 2,83 | 3,82 |
| | c/16 = 1,418 | 2,05 |
| | c/32 = 0,709 | 1,04 |
| | | |



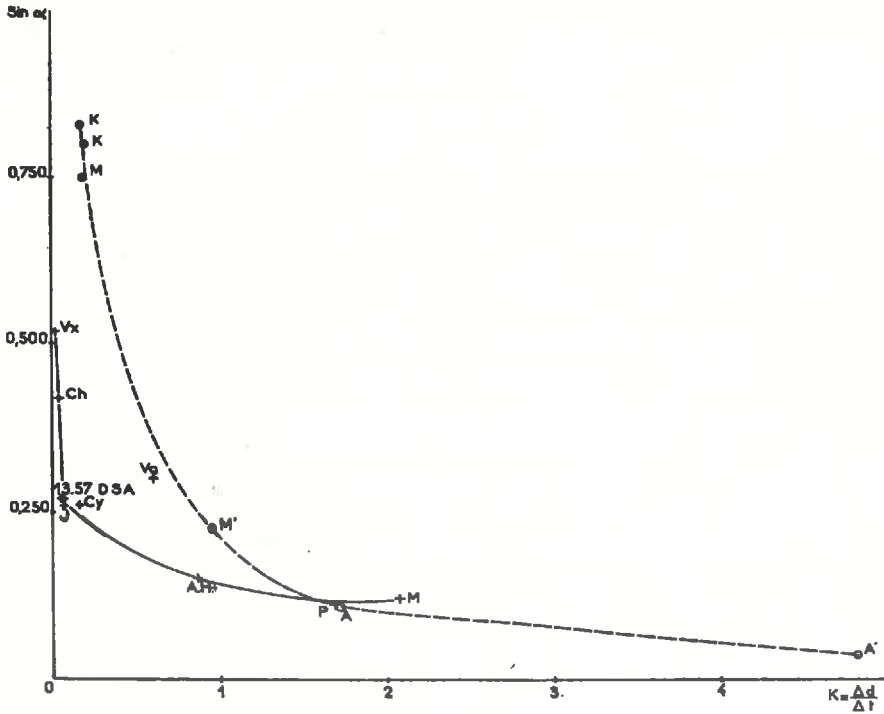
GRAPHIQUE VII.

Dans tous les chiffres donnés par la suite, nous avons tenu compte des surcharges additionnelles et du coefficient de passage d'un écran à l'autre. Dans le tableau XVI, sont notées, en fonction de la concentration, les valeurs de la densité optique en lumière transmise. A l'aide de ces données, nous avons construit les courbes correspondantes (graph. VII) qui sont réparties en petits paquets :

- Pagny, Molphey, Aige Henroux,
- Jaily, Changey, 13 D. S. A., 57 D. S. A., Varanges,
- Chatillon, Vitteaux 43.

Les courbes d'analyse thermique ayant révélé à peu près le même mélange hydroxydes, Kaolinite, Illite, avec proportions un peu différentes

de ces éléments dans le cas de *Aige Henroux, Molphey, Jaily, Chatillon*, nous pouvons en conclure que les proportions des différents éléments constitutifs interviennent pour motiver les différences de densité optique.



GRAPHIQUE VIII.

Nous avons ensuite calculé, pour des dilutions de 1 à 4, les variations Δd et Δt et le facteur $K = \frac{\Delta d}{\Delta t}$ (tableau XVII). La construction du cercle trigonométrique sur le graphique L, c , nous a permis de calculer $\sin \alpha$. Nous avons ainsi construit le graphique $\sin \alpha, K$ (graph. VIII). Sur ce graphique, les points figuratifs peuvent se placer suivant deux courbes différentes :

1° la courbe des argiles-types, quelle que soit la dimension de leurs grains (courbe en trait plein) ;

2° la courbe des argiles agronomiques (courbe en pointillé).

Nous avons ensuite évalué l'erreur faite sur chaque suspension en rapportant son point figuratif successivement aux deux courbes.

On voit dans le tableau XVIII que l'erreur sur chaque suspension est admissible dans certains cas, à condition que l'on ait envisagé la courbe qui lui correspond. Autrement dit, il ne sert à rien d'avoir tracé la courbe $\sin \alpha, K$ des argiles-types si l'on étudie des argiles extraites des terres et vice-versa.

mélangeur pendant 9 minutes avec 5 cc de KOH (N), NaOH (N) ou NH_4OH (N) pour 50 g de terre. Les lectures au densimètre sont faites sur la suspension complétée à 1,250 cc après 1 min. et 15 min.

Pour BOUYOUCOS, « le densimètre mesure la quantité de suspension dans la colonne entière du liquide sans tenir compte de la densité en fonction de la profondeur », c'est-à-dire que « les lectures faites sur le densimètre donnent la moyenne des densités pour la colonne entière de liquide du sommet au point où la colonne solide de sol se forme par chute des particules ».

Le calibrage de l'appareil consiste à déterminer le temps durant lequel la suspension dispersée doit rester dans le cylindre avant qu'une lecture au densimètre donne l'équivalent de l'analyse mécanique obtenue par la méthode pipette. La classification des particules se fait en quatre lots :

1° Sable total : 1 à 0,5 mm

2° Limon : 50μ à 5μ .

3° Argile : $< 5\mu$.

4° Colloïdes : $< 2\mu$.

La méthode densimétrique permet de déterminer :

— le limon (50μ) après 1 min. ;

— les colloïdes totaux (5μ) après 15 min. ;

— l'argile ($5\mu-2\mu$) après 1 h. ;

— les colloïdes (2μ) après 2 h. ;

— le sable grossier est déterminé par tamisage et le sable fin par différence.

b) MISE AU POINT RÉCENTE

Dans une note récente (17) BOUYOUCOS expose la révision qu'il a fait subir à la méthode densimétrique par le fait d'un changement de classification des particules. Deux classifications sont en usage actuellement aux U. S. A. :

1° U. S. Dept. of Agriculture : sable total = 2 — 0,05 mm, limon = 50μ — 2μ .

2° Société Internationale de la Science du Sol (I. S. S. S.) : sable total = 2 — 0,02 mm, limon = 20μ — 2μ .

A l'aide d'un grand nombre de tests, il a mis au point, le temps après lequel le densimètre donne le même résultat que la méthode pipette. Pour correspondre aux deux classifications utilisées, il faut prélever aux temps suivants :

| | Sables | Limon |
|---------------------------------|---------|-------|
| U. S. Dept of Agriculture | 40 sec. | 2 h. |
| I. S. S. S. | 4 min. | 2 h. |

Ses appareils ont été améliorés :

— le mixer a une capacité et une vitesse plus grandes,

— le densimètre a un flotteur de forme glissante gradué de 0 à 60 g par litre,

- le cylindre contenant la suspension a deux graduations : 50 et 100 g,
- la dispersion se fait à l'hexamétaphosphate de sodium.

Il signale, comme autrefois, que la densité enregistrée est la moyenne de toutes les densités du sommet de la colonne au point où le sol est sédimenté. Il donne comme illustration l'exemple suivant :

Lecture de la colonne entière : 16 g/litre

Lecture de la moitié supérieure de la colonne : 14,2 g/l

Lecture de la moitié inférieure de la colonne : 17,5 g/l

Moyenne calculée : 15,85 g/l

Lecture des deux moitiés mélangées : 16,1 g/l.

2° Critique

La méthode densimétrique de BOUYOUCOS est critiquable sur bien des points et a été très critiquée.

a) *Mesure du poids spécifique moyen d'une couche épaisse.* C'est le principal grief que l'on peut établir contre la méthode.

α) *Mesure de la colonne 0-3* Comme nous l'avons vu antérieurement (p. 64) BOUYOUCOS prétend mesurer la densité de toute la colonne liquide de la surface au plan de séparation suspension-particules déposées. Autrement dit, une partie de la suspension qui ne contient ni tige ni flotteur intervient dans la mesure.

Il est *a priori* évident que le densimètre n'est influencé que par la colonne liquide qui correspond à sa profondeur. Néanmoins, nous avons voulu faire une vérification expérimentale. De ce fait, nous avons étudié comment variait la densité d'un mélange non miscible eau-tétrachlorure de carbone. Les hauteurs h des plans séparateurs des liquides sont rapportées aux plans de base du flotteur réel cylindro-biconique considéré comme plan 0. Les deux liquides étudiés séparément donnent les densités suivantes (à 18°, sans correction de l'erreur due au ménisque et au coefficient de dilatation du verre) :

| | |
|------------------------|--------|
| Eau distillée | 0,9998 |
| CCl ₄ | 1,601 |

Le mélange des deux liquides en proportion variable de façon à modifier la hauteur h donne les valeurs de densité suivantes :

| h cm | ρ |
|--------|--------|
| — 0,2 | 0,9998 |
| 0 | 1 |
| + 0,4 | 1,0015 |
| + 1,2 | 1,0045 |
| + 1,9 | 1,0095 |
| + 2,4 | 1,016 |
| + 2,8 | 1,0222 |
| + 3,2 | 1,0282 |

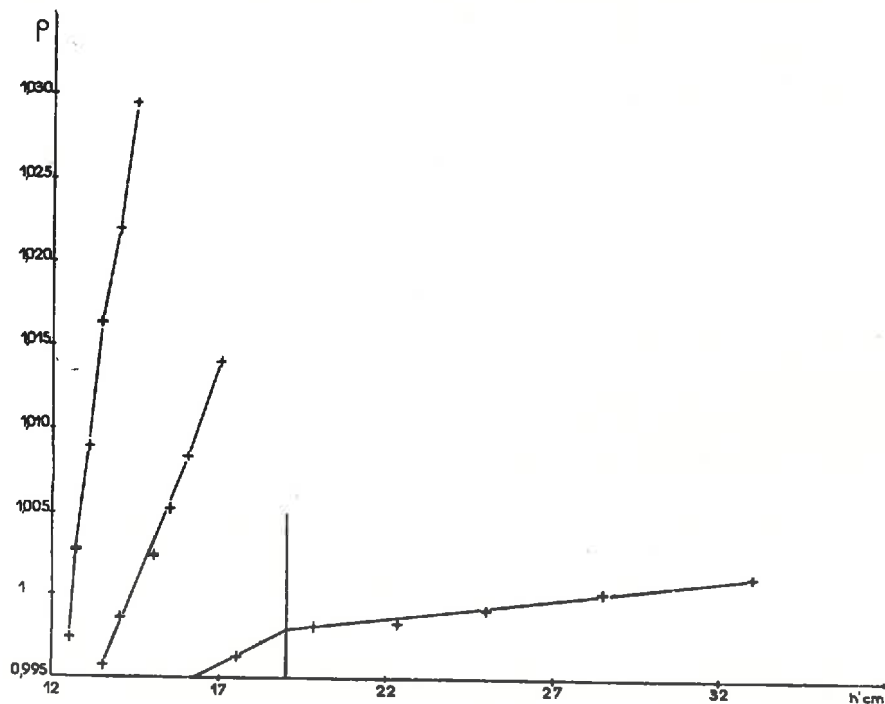
Il apparaît donc que, tant que le plan C Cl₄-H₂O est inférieur à la base du flotteur, la densité n'est pas modifiée. La colonne de suspension

qui influence le densimètre est comprise entre le plan suspension-air et le plan de base du flotteur. Les différentes fractions de cette colonne jouent de façon variable suivant qu'elles se rapportent au flotteur ou à la tige. Nous avons étudié les mélanges non miscibles eau-benzène et $\text{ClNa} + \text{H}_2\text{O}$ -benzène pour mettre en évidence l'influence prépondérante du flotteur. La hauteur h' traduit la hauteur de la partie du flotteur qui se trouve immergée dans l'eau.

Eau-C₆H₆

| <u>h'cm</u> | <u>ρ</u> |
|-------------|--------------------------|
| + 17,5 | 0,9962 |
| + 19,8 | 0,9981 |
| + 22,3 | 0,9983 |
| + 25 | 0,999 |
| + 28,5 | 1 |
| + 33 | 1,001 |

Les densités de l'eau et de C_6H_6 sont respectivement, dans les conditions de l'expérience : 1,001 et 0,769. Le plan de séparation tige-flotteur se situe à + 19 cm. On voit que la courbe ρ, h' (graphique IX) change brus-



GRAPHIQUE IX.

quement de pente à partir de $h = 19$ cm, traduisant une efficacité plus grande de la pointe supérieure du flotteur, que de la tige. Afin d'étudier l'influence du cône supérieur du flotteur, nous avons, à l'aide d'autres

mélanges non miscibles : H₂O, ClNa 30 g/l et H₂O, ClNa 70 g/l, fait des mesures identiques aux précédentes qui nous donnent les résultats suivants :

| ClNa 30 g/l h'cm | 0,9999 ρ | ClNa 70 g/l h'cm | 1,048 ρ |
|---------------------|-------------|---------------------|------------|
| + 14 | 0,9957 | + 12,5 | 0,9975 |
| + 14,5 | 0,9987 | + 12,7 | 1,0028 |
| + 15 | 1,0024 | + 13,1 | 1,009 |
| + 15,5 | 1,0052 | + 13,4 | 1,0163 |
| + 16 | 1,0083 | + 14 | 1,024 |
| + 17 | 1,0141 | + 14,5 | 1,0295 |

Les courbes correspondantes sont également représentées sur le graphique IX. La limite cylindre-cône supérieur se situe à 12,5 cm. Il en résulte que les liquides étudiés ne nous ont pas permis d'établir une courbe concernant les autres parties du flotteur, mais nous pouvons admettre que l'influence du flotteur entier est tellement grande par rapport à celle de la partie immergée de la tige que l'on peut négliger cette dernière et considérer que la zone de mesure est la colonne correspondant au flotteur. Une autre raison peut nous conduire à négliger l'effet de la tige, c'est qu'il traduit l'action de la partie la moins concentrée de la suspension.

β) Pour GESSNER (19), la mesure du poids spécifique moyen d'une couche épaisse pourrait se concevoir à condition soit de réduire la zone a supérieure à la zone effective b, soit d'augmenter la hauteur de a et de diminuer la hauteur de b.

Dans les conditions où opère BOUYOUCOS, au temps t , il existe en b des particules communes à la zone a et d'autres qui ne se trouvent plus en a (fig. 11). Le calcul est très compliqué et le seul moyen d'en sortir consiste à rendre a suffisamment petit pour qu'il soit négligeable. Dans ce cas, l'on mesure la densité de toutes les particules de vitesse $v \leq \frac{h}{t}$ (si h est la profondeur de la base du flotteur mesurée à partir de la surface), moins un certain nombre de particules inférieures à cette vitesse. La totalité du lot de vitesse $v \leq \frac{h}{t}$ sera donnée par la tangente à la courbe (voir interprétation des résultats, p. 16).

Par contre, si un flotteur très court (b très petit) était immergé à une grande profondeur (a très grand) on obtiendrait alors une courbe d'accumulation des particules.

γ) *Mesure d'une zone épaisse.* La densité indiquée sur la tige du densimètre est la densité moyenne d'une colonne de suspension le long de laquelle la densité varie de haut en bas. Elle est associée à une zone épaisse de suspension et non à un niveau déterminé. Cette imprécision empêche la détermination des dimensions des particules responsables de la densité observée. Nous avons vu antérieurement (p. 16) que la courbe expérimentale permet par construction de tangente d'obtenir la concen-

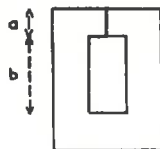


FIG. 11.

f) *Perturbation de la sédimentation par les oscillations du flotteur*

C'est aussi une cause d'imprécision. Même si l'on opère de façon très délicate, l'introduction et le retrait du densimètre perturbent la sédimentation. Le flotteur, en pénétrant dans la suspension, enfonce les couches supérieures et provoque la remontée des couches inférieures en produisant un mélange des couches de densités différentes. C'est là une source d'erreur commune à toutes les techniques densimétriques qui pratiquent l'immersion temporaire.

g) *Manque de bases fondamentales*

A. N. PURI fait ce reproche à la méthode de BOUYOUCOS, d'après l'insistance de l'auteur à fixer des conditions arbitraires. Il faut travailler avec un instrument déterminé, dans des conditions rigoureuses, définies. La graduation de ce densimètre en Gr/litre est très empirique. Bien qu'elle ait été établie après un grand nombre de tests, elle ne peut rendre compte de la composition granulométrique de tous les types de sols. Si elle est valable pour les sols moyens, elle sera une source d'erreur dès que la courbe granulométrique sera anormale.

On peut *résumer* en une phrase toutes les critiques concernant la méthode de BOUYOUCOS (24) : « La technique du densimètre consiste à mesurer à un temps arbitraire la densité moyenne d'une couche de plusieurs centimètres de long dont la densité change continuellement avec la profondeur et le temps », cette couche s'enfonçant en outre progressivement. Il s'agit là d'une méthode qualitative qui peut avec des précautions donner des résultats expérimentaux avec une précision raisonnable parce que certaines erreurs expérimentales se compensent. Nous avons cherché, à l'aide d'un appareil aussi simple que le sien, à opérer dans des conditions plus rigoureuses, en partant de bases scientifiques.

CHAPITRE II

DISCUSSION DE LA MÉTHODE DENSIMÉTRIQUE

1) Généralités

La méthode densimétrique telle que nous l'utilisons, c'est-à-dire par lecture de la densité de la suspension dont on déduit le pourcentage en poids des particules correspondant à la colonne envisagée (et non par lecture directe de la concentration en gramme par litre sur la tige comme l'a

fait BOUYOCOS dans ses travaux) fait intervenir la formule (20) indiquée antérieurement (p. 23).

$$P = \frac{100 V' \rho_s (\rho - \rho_1)}{x \rho_s - \rho_1}$$

où nous rappelons que :

P = pourcentage en poids du matériau terreux,

V' = volume total de la suspension en cc

x = prise d'essai en g

ρ = masse spécifique de la suspension

ρ_s = masse spécifique du solide

ρ_1 = masse spécifique du liquide interparticulaire.

2) Erreurs sur ρ_s

Dans le chapitre précédent, nous avons signalé que dans la méthode de BOUYOCOS, la densité du matériau sol diffèrait de 2,65, en raison de la non-destruction des matières organiques de densité plus faible. Mais dans toutes les méthodes qui utilisent la sédimentation, la valeur prise habituellement pour la masse spécifique du sol : $\rho_s = 2,65$ qui est une valeur moyenne établie sur un grand nombre de sols, ne correspond pas exactement à la valeur rigoureuse de chacun des constituants du sol.

Des deux sortes d'erreurs qui en découlent, l'une concerne la loi de STOKES ; elle est inhérente à tous les systèmes d'analyse mécanique qui reposent sur le mouvement des particules ; l'autre influe sur la densité de la suspension.

Le pourcentage calculé d'après la formule précédente pour une valeur de ρ_s égale à 2,65 est erroné quand ρ_s est différent de 2,65. Ce pourcentage d'erreur sur P s'exprime d'après l'équation suivante :

$$\frac{P_c - P}{P} \times 100 = \frac{\rho_s - 2,65}{1,65\rho_s} \times 100$$

où P_c = pourcentage de particules, calculé avec $\rho_s = 2,65$ et où l'on suppose que $\rho_1 = 1$.

Si ρ_s est supérieur à 2,65, l'erreur est positive, autrement dit P est sur-estimé et vice-versa.

Comme la densité du limon présente plus de variations que celle de l'argile, la détermination sera moins précise dans le premier cas que dans le deuxième.

Des calculs théoriques faits par I. A. BLACH (22) montrent, sur un sol de composition mécanique moyenne, que lorsque ρ_s varie de 2,6 à 2,7, l'erreur relative sur le limon est de + 2,2 %, tandis que l'erreur relative sur l'argile est seulement de + 1,4 %. Mais en réalité, ces erreurs sont la somme de l'erreur sur la loi de STOKES et de l'erreur sur la densité de la

suspension. La première de ces erreurs, pour la même variation de ρ_s est — 0,8 % pour l'argile et 0 pour le limon.

D'où l'on déduit que, en réalité, l'erreur faite strictement sur la densité de la suspension est la même qu'il s'agisse de l'argile ou du limon, mais que la résultante de l'erreur précédente et de l'erreur sur la loi de STOKES est plus élevée dans le cas du limon que dans celui de l'argile.

En résumé, les erreurs dues à ρ_s : erreur sur la loi de STOKES et erreur sur la densité de la suspension, jouent en sens inverse, mais ne s'annulent pas parce que la deuxième est plus importante que la première. Et, en dépit de cette action compensatrice, l'erreur due à cette cause est plus importante dans la méthode densimétrique que dans la méthode pipette.

3) Erreur sur ρ_1

Considérons la densité du liquide interparticulaire ρ_1 . Dans le cas le plus simple, ce liquide est de l'eau distillée dont la densité à 20° est 0,998259 et présente de 15° à 25° des variations allant de 0,999160 à 0,997120.

Dans la pratique, la dispersion étant mal réalisée à l'eau distillée pure, on utilise un agent dispersif le plus souvent représenté par le pyrophosphate de sodium $P_2O_7Na_4 + 10H_2O$ ou le citrate de sodium $C_6O_7H_8Na_2 + 3H_2O$. Ces deux sels donnent aux deux solutions correspondantes une densité supérieure à celle de l'eau pure. Il est très important de tenir compte de la valeur réelle de ρ_1 dans le calcul du pourcentage en poids de particules, comme le démontre le tableau suivant établi pour un volume V' de suspension de 1 000 cc dont la densité ρ est 1,010 et la prise d'essai x est 30 g.

| ρ_1 | P | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ |
|----------|-------|---------------------------------|
| 0,997 | 69,58 | + 29,98 |
| 0,9975 | 66,90 | + 25,01 |
| 0,998 | 64,23 | + 20 |
| 0,9985 | 61,56 | + 15 |
| 0,999 | 58,88 | + 10,01 |
| 0,9999 | 54,06 | + 1,008 |
| 1 | 53,53 | 0 |
| 1,0001 | 52,99 | — 1,008 |
| 1,0005 | 50,85 | — 5,1 |
| 1,001 | 48,17 | — 10,01 |
| 1,0015 | 45,50 | — 15 |
| 1,002 | 42,82 | — 20 |
| 1,0025 | 40,14 | — 25,01 |

Nous avons réalisé des solutions renfermant par litre respectivement d'une part 10 cc, 20 cc et 30 cc d'une solution normale de citrate de sodium (119 g/litre), c'est-à-dire 1,19 g, 2,38 g et 3,57 g de citrate de sodium, et d'autre part 10 cc, 20 cc et 30 cc d'une solution normale de pyrophosphate de sodium (149 g/l) c'est-à-dire 1,49 g, 2,98 g et 4,47 g de pyrophosphate

de sodium. La densité de ces différentes solutions a été déterminée à des températures différentes et a montré à 19°5 la variation suivante en fonction de la concentration en sel (les différentes corrections imputables au fait que notre densimètre est gradué peu rigoureusement, et destinées à compenser cette approximation, ont été faites).

| Teneur en solution normale en cc/l | 0 cc/l | 10 cc/l | 20 cc/l | 30 cc/l |
|------------------------------------|----------|---------|---------|---------|
| citrate de sodium | 0,998258 | 0,9991 | 0,9998 | 1,0004 |
| pyrophosphate de sodium | 0,998259 | 0,9988 | 0,9996 | 1,0001 |

(Pour $V' = 1000$ cc. $x = 30$ g et $\rho = 1,010$)

Si nous calculons la variation de P et du pourcentage d'erreur correspondant à ces différentes valeurs de ρ_1 (l'erreur est rapportée à la valeur concernant $\rho_1 = 1$), nous obtenons les valeurs suivantes :

Citrate de sodium

| C g/l | ρ_1 | P | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ |
|-------|----------|-------|---------------------------------|
| 0 | 0,998259 | 62,85 | + 17,41 |
| 1,19 | 0,9991 | 58,35 | + 9 |
| 2,38 | 0,9998 | 54,60 | + 2 |
| 3,57 | 1,0004 | 51,39 | - 4 |

Pyrophosphate de sodium

| C g/l | ρ_1 | P | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ |
|-------|----------|-------|---------------------------------|
| 0 | 0,998259 | 62,85 | + 17,41 |
| 1,49 | 0,9988 | 59,95 | + 12 |
| 2,98 | 0,9996 | 55,67 | + 4 |
| 4,47 | 1,0001 | 52,99 | - 1 |

Dans nos expériences, nous avons employé comme dose de dispersif la quantité préconisée par la méthode de dispersion au citrate de sodium qui précède l'analyse à la pipette, c'est-à-dire 10 cc/l d'une solution normale de citrate de sodium ou de pyrophosphate de sodium pour une prise d'essai de 10 g. Comme notre prise d'essai, après plusieurs tentatives préliminaires, a été fixée à 30 g, la quantité de dispersif ajoutée est 30 cc par litre d'une solution normale. Nous avons donc pour nos calculs, choisi la valeur de ρ_1 correspondant à cette dose, soit 1,0004 pour le citrate et 1,0001 pour le pyrophosphate. Mais par là la valeur du pourcentage calculé est entachée de deux erreurs :

1° les 30 cc par litre de citrate ou de pyrophosphate ne sont pas en réalité dilués à 1 000 cc comme si l'on avait affaire à une solution, mais ils sont dilués à : 1 000 cc — volume occupé par 30 g de terre. Si l'on prend 2,65 pour la densité de la terre, le volume occupé par celle-ci est : 11,32 cc, c'est-à-dire que la concentration en citrate de sodium est :

$$\frac{3,57g}{988,68cc} = 3,61 \text{ g/l}$$

Si l'on extrapole les valeurs données dans les tableaux précédents, on obtient comme valeur du pourcentage et de l'erreur :

$$P = 51,29$$

$$\frac{\Delta P}{P} \times 100 = 4,18$$

Dans le cas du pyrophosphate de sodium, la concentration réelle est :

$$\frac{4,47g}{988,68cc} = 4,52 \text{ g/l}$$

ce qui détermine : $P = 52,90$

$$\frac{\Delta P}{P} \times 100 = - 1,18$$

On voit que la différence entre les valeurs calculées avec ρ_1 correspondant à 30 cc/l de solution normale dilués à 1 000 cc d'une part et 30 cc/l dilués à 988,68 cc sont négligeables :

$$P (1.000 \text{ cc}) - P' (988,68 \text{ cc}) = 0,10 \text{ environ}$$

$$100 \left(\frac{\Delta P}{P} - \frac{\Delta P'}{P'} \right) = 0,18$$

Ces différences sont inférieures à l'erreur faite sur la détermination du pourcentage.

2° Les molécules de citrate et de pyrophosphate de sodium, en solution dans le liquide, exercent leur pouvoir dispersant par fixation sur les micelles argileuses. La fixation des ions se fait par attraction électrostatique entre ions de charge opposée, les uns faisant partie de la surface de la particule, les autres appartenant au liquide. Les ions fixés sont en cortège et leur densité de répartition diminue à mesure que l'on s'éloigne de la paroi de la micelle. Les ions citrate, pyrophosphate et sodium seront à des distances variables de la micelle, mais il est difficile de présumer si les plus rapprochés de la paroi interviennent dans la densité du liquide interparticulaire ou dans la densité de la particule. Dans le deuxième cas, la concentration du liquide vide serait inférieure à 3,61 g/l (citrate) ou 4,52 g/l (pyrophosphate). Elle se rapprocherait de la valeur prise pour base de nos calculs : 3,57 g/l (citrate) et 4,47 g/l (pyrophosphate), ce qui contrebalancerait l'erreur du paragraphe n° 1. Par contre, si ces molécules font partie

de la micelle, elles en augmentent le volume donc en diminuent la densité, ce qui entraîne comme conséquence une légère diminution du pourcentage.

Donc, dans les deux cas : molécules de sel faisant intégralement partie du liquide intermicellaire ou molécules de sel partiellement rattachées à la particule, on a une faible diminution de valeur du pourcentage. L'erreur dans les deux cas est vraisemblablement du même ordre de grandeur, c'est-à-dire négligeable.

Il convient d'envisager maintenant les phénomènes consécutifs à l'introduction dans une solution de citrate de sodium ou de pyrophosphate de sodium, de particules de terre dont les micelles argileuses sont porteuses d'ions H ou K ou même Ca, suivant que l'on procède ou non à des lavages sur filtre avec ClK avant la mise en dispersion. Il se produira un échange avec réaction d'équilibre entre les différents ions en présence. Le fait qu'on trouve en solution à la place de certains ions Na un nombre correspondant d'ions H ou K ou Ca ne modifie certainement pas ρ_1 de façon sensible. Autrement dit, l'introduction du matériau terre n'influe pas sensiblement sur la densité du liquide vide.

4) Erreur sur ρ

Il reste à étudier si la dispersion du matériau terre de densité donnée ρ_s dans un liquide de densité également donnée ρ_1 donne une suspension dont la densité réelle est bien celle que l'on peut calculer en partant de ρ_s , de ρ_1 et de la masse de terre introduite. En d'autres termes, il s'agit de savoir s'il n'y a pas de modification, de ρ_1 autre que celle que nous évoquions à la fin du paragraphe 3), modification due à un échange d'ions entre les particules et la solution.

Nous avons, à cet effet, étudié d'une part un mélange eau-alcool 96°, d'autre part une suspension de terre à 30 g/l. Ces déterminations ont été faites par la méthode du flacon.

a) EAU-ALCOOL

A la température de 22°6, nous avons obtenus les résultats suivants :

| | |
|-------------------------------------|----------|
| Flacon vide | 21,525 g |
| Flacon + eau distillée | 70,675 g |
| Flacon + alcool 96° | 61,200 g |
| Flacon + mélange eau — alcool | 67,165 g |

Densité de l'alcool 96° :

$$\frac{61,200 - 21,525}{70,675 - 21,525} = 0,807$$

Densité du mélange eau-alcool en parties égales :

$$\frac{45,640}{49,150} = 0,928$$

Densité calculée du mélange ci-dessus :

$$(\rho \text{ de l'eau distillée à } 22^{\circ}6 = 0,9978)$$

$$\frac{0,9978 + 0,807}{2} = 0,9024$$

b) SUSPENSION DE TERRE A 30 G/l (à la température de 23°5)

α) détermination de ρ_s sur 5 g de terre :

| | |
|---------------------------------------|----------|
| Flacon + eau distillée..... | 70,697 g |
| Flacon + 5 g de terre + eau dist..... | 73,722 g |

$$\rho_s = \frac{10}{(70,697 + 5) - 73,722} = 2,53$$

β) détermination de ρ_1 (30 cc citrate Na par litre)

| | |
|-----------------------------|----------|
| flacon vide | 21,525 g |
| flacon + eau distillée..... | 70,697 g |
| flacon + liquide | 70,806 g |

$$\rho_1 = \frac{49,281}{49,172} = 1,002$$

γ) détermination de ρ (30 g de terre par litre + 30 cc de citrate de NaN/10).

flacon + suspension : 71,840 g

$$\rho = \frac{50,315}{49,281} = 1,021$$

δ) calcul de ρ

volume occupé par le liquide :

$$1000cc - \frac{30}{2,53} = 988,15cc$$

$$\rho = \frac{30 + (988,15 \times 1,002)}{1000} = 1,020$$

On voit que la densité mesurée de la suspension est à 1 p. 1000 près égale à la densité calculée. Autrement dit, l'introduction du solide ne modifie pas la densité du liquide. Il se produit pourtant une certaine contraction de l'eau au contact de l'argile, ce qui entraîne une élévation de la densité de ces couches d'eau adhérentes. Mais cette modification porte sur la 3^e décimale de la densité, tandis que dans le cas du mélange eau-alcool, la différence se fait sentir sur la 2^e décimale, en raison de la contraction de volume qui accompagne l'introduction de l'alcool dans l'eau.

On peut donc conclure que l'introduction des particules de terre dans la solution aqueuse de citrate de sodium ne modifie pratiquement en rien la densité de cette solution.

CHAPITRE III

EXPOSÉ DES RÉSULTATS

Avant de mettre au point la méthode, nous avons effectué des recherches sur des suspensions contenant des doses variables de terre (10 g, 20 g, 30 g, 40 g, 50 g, 60 g par litre) avec pour agent dispersant NH_4OH $\text{P}_2\text{O}_7\text{Na}_4$ et citrate de Na, en doses variables, avec ou sans lavage à ClK , en mesurant la densité d'une part en surface à l'aide d'un uréomètre très court, d'autre part en profondeur avec le densimètre de forme torpille adopté ultérieurement et sur lequel sont basés nos calculs.

Nous avons ensuite comparé les deux méthodes : immersion temporaire et immersion permanente. Les interprétations ont été faites en envisageant d'une part l'action de la colonne active de suspension, d'autre part en situant le plan de densité moyenne à des profondeurs différentes.

1° Influence de la prise d'essai

Pour que la sédimentation s'effectue normalement, il convient que le milieu soit assez dilué, de façon que la viscosité de la suspension ne soit pas trop élevée, afin d'éviter des phénomènes de rigidité. Mais d'autre part, une dilution trop grande a pour conséquence une densité de la suspension faible et une diminution de la précision. Dans le but de mettre au point la concentration optima par l'analyse densimétrique, nous avons avec les deux densimètres, opéré sur des suspensions contenant respectivement 10 g, 20 g, 30 g, 40 g, 50 g, 60 g de terre par litre. Les résultats exposés dans les tableaux suivants sont obtenus en considérant le plan de profondeur effective h_e , calculé pour le cylindre équivalent au cylindro-bicône réel, comme nous l'avons expliqué pages 33 à 37. Pour l'uréomètre, nous n'avons pas établi la similitude approchée entre la forme réelle et le cylindre, mais il est raisonnable de supposer que si l'équivalence joue dans le cas du cylindro-bicône, elle joue aussi sans erreur appréciable dans le cas du flotteur de forme moins régulière de l'uréomètre.

Les expériences ont porté sur deux terres différentes : l'une, *Providence*, riche en argile (40 %) et dont la totalité des éléments inférieurs à 20μ est 66 %, l'autre, *Chocelle*, comprenant 48 % < 20μ et 13,2 % < 2μ .

Tous les résultats sont exprimés en pourcentages.

TABLEAU XIX

Providence (+ 10 cc pyrophosphate Na)

| | | 10 g | 20 g | 30 g | 40 g | 50 g | 60 g |
|---------------------|----------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| Pipette | 20 μ | 65,5 | 66 | 68 | 64,12 | 52,1 | 46,91 |
| | 2 μ | 40 | 34,75 | 28,39 | 26,12 | 12 | 10,58 |
| Densimètre torpille | 20 μ | 64,24 | 63 | 66 | 67 | 56 | 50,5 |
| | 2 μ | 44,96 | 41 | 31 | 38 | 19 | 15 |
| Uréomètre | 20 μ | 48 | 59 | 60 | 60 | 57 | 59 |
| | 2 μ | 33 | 34 | 35 | 37 | 19,5 | 13,5 |

TABLEAU XX

Chocelle (10 cc pyrophosphate Na)

| | | 10 g | 20 g | 30 g | 40 g | 50 g | 60 g |
|---------------------|----------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| Pipette | 20 μ | 47 | 49,25 | 48 | 49,9 | 51,4 | 51 |
| | 2 μ | 13 | 16,25 | 13,17 | 14,25 | 14,2 | 13,66 |
| Densimètre torpille | 20 μ | 36 | 45 | 48 | 49 | 52 | 51 |
| | 2 μ | 5 | 12 | 15 | 16,4 | 15 | 15,6 |
| Uréomètre | 20 μ | 25 | 22 | 40 | 46 | 51 | 52 |
| | 2 μ | | | 8 | 10 | 10,5 | 14,5 |

L'examen des deux tableaux XIX et XX conduit aux observations suivantes :

La terre de *Providence* donne par l'analyse à la pipette des résultats variant en fonction inverse de la concentration, ce qui s'explique facilement par une dispersion incomplète due à une insuffisance d'agent dispersant. Les résultats densimétriques les plus voisins de ceux de la pipette correspondraient à une prise d'essai de 30 g/l pour le densimètre torpille. Pour l'uréomètre, la meilleure concordance se ferait à 20 g/l, mais la dispersion de la suspension étant défectueuse, il peut se produire dans la zone supérieure où travaille l'uréomètre, une diminution de la concentration due à la chute rapide des particules mal désagrégées.

Sur *Chocelle*, la meilleure concordance est obtenue pour 30 g-50 g avec le densimètre torpille et 60 g avec l'uréomètre.

En résumé, l'on constate que :

10 g est une quantité toujours trop faible,

30 g convient pour le densimètre torpille (peut-être 20 g dans le cas de terres très argileuses),

60 g convient pour l'uréomètre.

2° Influence de l'agent dispersant et de sa dose

Dans les expériences précédentes, la notion de prise d'essai idéale est liée à la dose d'agent dispersant.

Afin de préciser l'influence de cet agent et de ses doses d'emploi, nous avons opéré sur d'autres suspensions de *Providence* pour lesquelles la quantité de dispersif était variable. Cette terre étant très argileuse, les concentrations initiales en éléments terreux ont été réduites à 10, 20 et 30 g/l, tandis que les concentrations de *Chocelle* ont été choisies égales à 20, 30 et 50 g/l, et la dose d'agent dispersant est demeurée la même.

Les agents peptisants employés sont : le citrate de sodium, le pyrophosphate de sodium et l'ammoniaque (4 cc NH_4OH (N)/l).

a) ÉTUDE DE LA TERRE DE PROVIDENCE

Les résultats obtenus sont exposés dans les tableaux suivants :

TABLEAU XXI

Providence — 30 g/l — + 4 cc NH_4OH (N)/l

| | r ^{re} préparation | 2 ^e préparation | 3 ^e préparation | 4 ^e préparation |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Pipette 20 μ | 69,3 | 68,3 | 68 | 68 |
| 2 μ | 40,6 | 42,2 | 41,3 | 41,3 |
| Densimètre torpille . 20 μ | 66,5 | 69,8 | 64,2 | 63,6 |
| 2 μ | 38,8 | 38 | 34,4 | 38 |
| Uréomètre 20 μ | 62 | 68 | 63 | 59 |
| 2 μ | 45,5 | 44,8 | 43,5 | 41 |

TABLEAU XXII

Providence (avec quantités variables de pyrophosphate)

| | 10 g/l (10 cc) | 30 g/l (20 cc) | 40 g/l (20 cc) | 60 g/l (20 cc) |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Pipette 20 μ | 69,66 | 67,25 | 67,7 | 73,5 |
| 2 μ | 30,66 | 37,25 | 38,2 | 46,5 |
| Densimètre torpille . 20 μ | 75 | 74 | 75 | 74 |
| 2 μ | 44 | 49,5 | 50 | 54 |
| Uréomètre 20 μ | 44 | 68 | 73 | 75 |
| 2 μ | 25 | 44,5 | 48 | 43,8 |

TABLEAU XXIII

Providence (avec quantités proportionnelles de dispersant)

| | 10 g/l (10 cc) | | 20 g/l (20 cc) | | 30 g/l (30 cc) | |
|------------------------------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
| | Pyro-phosphate | Citrate | Pyro-phosphate | Citrate | Pyro-phosphate | Citrate |
| Pipette 20 μ | 61 | 65,4 | 70,5 | 69,3 | 68,3 | 68,3 |
| 2 μ | 29,5 | 43,2 | 43,5 | 42,9 | 40,2 | 42,3 |
| Densimètre torpille 20 μ | 59,5 | 62,4 | 65,1 | 64,6 | 66,4 | 67,5 |
| 2 μ | 24 | 39,6 | 40,2 | 40,5 | 40,7 | 44,9 |
| Uréomètre 20 μ | 30,5 | 48,2 | 64,3 | 55,4 | 60,5 | 72,3 |
| 2 μ | 8 | 36,9 | 36,2 | 32,1 | 32,1 | 41,2 |

Il découle de l'observation des tableaux précédents que le chiffre de 30 g/l préconisé pour la prise d'essai est celui qui donne la meilleure concordance entre les résultats de la pipette et ceux du densimètre torpille, surtout avec l'emploi du pyrophosphate de sodium ou du citrate de sodium, à condition que ces agents soient utilisés suivant une dose proportionnelle à la prise d'essai. Autrement dit, pour une terre assez argileuse comme celle de Providence, les résultats obtenus avec 30 g/l de terre et 30 cc/l de pyrophosphate ou de citrate sont les meilleurs.

L'emploi de l'uréomètre montre l'insuffisance de la prise d'essai inférieure à 30 g/l. Et pour une suspension à 30 g/l de terre, c'est le citrate de sodium utilisé à 30 cc/l qui semble donner les meilleurs résultats.

b) ÉTUDE DE LA TERRE DE CHOCELLE

Les tableaux XXIV et XXV mettent en évidence les résultats obtenus pour les suspensions de cette terre par les différents agents dispersants à doses variables.

De l'examen des deux tableaux suivants, il découle que les meilleurs résultats sont obtenus avec le densimètre torpille à 30 g/l, par dispersion

TABLEAU XXIV

Chocelle 30 g/l + 4 cc NH_4OH (N)/l

| | 1 ^{ère} préparation | 2 ^e préparation | 3 ^e préparation | 4 ^e préparation |
|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Pipette 20 μ | 49,6 | 47,1 | 46,4 | 47,1 |
| 2 μ | 14,3 | 13,7 | 13,5 | 13,5 |
| Densimètre torpille.. 20 μ | 52 | 49 | 49 | 48 |
| 2 μ | 12,4 | 10,4 | 8 | 8,4 |
| Uréomètre 20 μ | 47 | 54 | 44 | 46 |
| 2 μ | 16 | 15,5 | 13 | 14 |

TABLEAU XXV

Chocelle (+ 10 cc de dispersant)

| | | 20 g/l | | 30 g/l | | 50 g/l | |
|----------------------|----------|------------|---------|------------|---------|------------|---------|
| | | pyrophosp. | citrate | pyrophosp. | citrate | pyrophosp. | citrate |
| Pipette | 20 μ | 46,5 | 46,8 | 47 | 48,5 | 51,2 | 49 |
| | 2 μ | 13,8 | 14,5 | 13,8 | 13,8 | 14,2 | 13,9 |
| Densim. torpille . . | 20 μ | 44 | 48 | 45,5 | 48,9 | 52 | 52 |
| | 2 μ | 11,3 | 12 | 13,8 | 13,8 | 15,2 | 15,2 |
| Uréomètre | 20 μ | 44,2 | 34,5 | 40,7 | 48,2 | 51,4 | 57,8 |
| | 2 μ | 10,5 | 10,5 | 8 | 8 | 14,4 | 14,4 |

au citrate de sodium (le pyrophosphate de sodium dans les mêmes conditions donne des résultats moins bons mais satisfaisants) et avec l'uréomètre à 50 g/l, à l'aide du pyrophosphate de sodium.

En résumé, il découle que, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, la prise d'essai optima est de 30 g/l, et de plus que les meilleurs agents dispersants semblent être le pyrophosphate et le citrate de sodium dont l'effet est voisin, ces agents étant employés dans le cas des terres argileuses à une dose proportionnelle à la prise d'essai.

Dans la suite de nos recherches, nous utiliserons le citrate de sodium. La quantité employée invariablement, que la terre soit très ou peu argileuse, sera 30 cc/l. Dans le cas d'une terre pauvre en argile, une faible partie de cette quantité de citrate sera utilisée effectivement pour la dispersion ; l'excédent demeure en solution dans la suspension et ne présente aucun inconvénient pour la marche de l'analyse.

3) Influence de la position du densimètre

Nous avons voulu étudier l'influence de la profondeur du flotteur dans la colonne de suspension sur la précision des résultats obtenus par rapport à la méthode de référence qui est la méthode pipette.

L'uréomètre travaillant en surface et le densimètre torpille en profondeur, nous avons comparé leurs résultats.

Sur la terre de Chocelle, peu argileuse, c'est-à-dire qui subit moins l'influence de la dose d'agent dispersant, nous pouvons établir des comparaisons suggérées par l'examen des tableaux XX et XXV, en considérant la prise d'essai de 50 g/l pour l'uréomètre et 30 g/l pour l'autre densimètre. (Nous éviterons de comparer les résultats obtenus avec la seule prise d'essai de 30 g/l, cette quantité n'étant pas optima pour l'uréomètre).

En considérant comme caractéristiques de cette terre les valeurs de

48 % pour 20 μ et 13,5 % pour 2 μ , moyennes d'un grand nombre de déterminations à la pipette, nous avons les comparaisons suivantes :

TABLEAU XXVI

| | densim. torpille 30 g/l | | uréomètre ; 50 g/l | |
|-------------------|-------------------------|---------|--------------------|---------|
| | 20 μ | 2 μ | 20 μ | 2 μ |
| Tableaux XX..... | 48 | 15 | 51 | 10,5 |
| Tableaux XXV..... | 45,5 | 13,8 | 51,4 | 14,4 |
| | 48,9 | 13,8 | 57,8 | 14,4 |

Il se dégage immédiatement de ce tableau que les meilleurs résultats sont donnés par le densimètre torpille, les erreurs relatives étant les suivantes :

densimètre torpille :

$$20\mu \frac{\Delta P}{P} \times 100 : \text{de } -5 \% \text{ à } +2 \%$$

$$2\mu \frac{\Delta P}{P} \times 100 : \text{de } 2,5 \% \text{ à } 11 \%$$

uréomètre :

$$20\mu \frac{\Delta P}{P} \times 100 : \text{de } 6 \text{ à } 20 \%$$

$$2\mu \frac{\Delta P}{P} \times 100 : \text{de } -20 \% \text{ à } +7 \%$$

En vue de préciser la sensibilité des deux appareils, nous avons ajouté à des suspensions de Chocelle à 30 g/l et 10 cc/l de pyrophosphate de sodium, les quantités suivantes d'argile : 3 g, 2,5 g, 2 g et 1,75 g et de limon : 10 g, 5 g, 2 g, 1 g.

Le tableau XXVII donne les résultats obtenus :

TABLEAU XXVII

Chocelle 30 g/l + quantités variables d'argile et de limon

| | Pipette | | Densim. torpille | | Uréomètre | |
|---------------------|----------|---------|------------------|---------|-----------|---------|
| | 20 μ | 2 μ | 20 μ | 2 μ | 20 μ | 2 μ |
| + 3 g d'argile..... | 49,7 | 18,8 | 48,5 | 20 | 42 | 13 |
| + 2,5 g "..... | 49,4 | 17,7 | 49 | 19,5 | 37 | |
| + 2 g "..... | 49,7 | 17,9 | 48,5 | 17,5 | 45 | 13 |
| + 1,75 g "..... | 49,6 | 17,8 | 49,5 | 18,5 | 42 | |
| + 10 g limon..... | 61,25 | 14,1 | 60 | 14 | 55 | 10,4 |
| + 5 g "..... | 56,6 | 14,4 | 56 | 13 | 49 | |
| + 2 g "..... | 50,15 | 13,75 | 49 | 13 | 44 | 7 |
| + 1 g "..... | 49 | 13,9 | 48 | 14,2 | | |

Pour que la comparaison de la sensibilité des différents procédés soit plus évidente, nous avons dressé sous forme de tableaux les variations ΔP du pourcentage en fonction de Δp = modification de la quantité introduite.

a) SUR L'ARGILE

TABLEAU XXVIII

| | Δp | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,25 |
|------------------------|--------------------------------|------------|-------------------|------------|----------|----------|
| Pipette..... | ΔP 2 μ 20 μ | 0,1 0,1 | 0,1 0,2 0,3 | 0,1 0,2 | 0,9 0 | 1 1,1 |
| Densimètre torpille... | ΔP 2 μ 20 μ | 1 1 | 0,5 2 0,5 | 1 0,5 | 2,5 0 | 1,5 1 |
| Uréomètre..... | ΔP 2 μ 20 μ | 0 3 | 0 5 8 | 0 5 | 0 3 | 0 0 |

b) SUR LE LIMON

TABLEAU XXIX

| | Δp | 1 g | 3 g | 4 g | 5 g | 8 g | 9 g |
|-----------------------|---------------------|------|------|-----|------|------|-------|
| Pipette..... | ΔP 20 μ | 1,15 | 6,45 | 7,6 | 5,25 | 11,1 | 12,25 |
| Densimètre torpille.. | 20 μ | 1 | 7 | 8 | 4 | 11 | 12 |
| Uréomètre..... | 20 μ | | 5 | | 6 | 11 | |

Le premier de ces tableaux montre que sur les fractions $< 2\mu$ la méthode pipette et le densimètre torpille ne sont pratiquement pas sensibles à la variation d'une quantité d'argile inférieure à 1 g, tandis que l'uréomètre ne possède aucune précision. Sur les fractions $< 20\mu$, la sensibilité correspond à une variation supérieure aux variations que nous avons provoquées.

La deuxième tableau met en évidence la sensibilité à une variation de 2 à 3 g.

En résumé, l'uréomètre manque totalement de sensibilité sur l'argile et présente une sensibilité acceptable sur le limon, tandis que les deux autres méthodes ont une sensibilité voisine.

En conséquence, l'emploi de l'uréomètre est contre-indiqué pour des déterminations d'éléments fins inférieurs à 2μ .

4) Comparaison des méthodes par immersion permanente et immersion temporaire et comparaison des différentes interprétations

Nous avons sur les mêmes suspensions procédé successivement à une analyse densimétrique par immersion permanente (c'est-à-dire en laissant

en permanence le densimètre dans la suspension) et à une analyse par immersion temporaire (avec introduction du densimètre une minute avant chaque lecture).

D'après la considération théorique du mélange des différentes couches, nous supposons page 32 que la formule 29 qui donne la situation du plan de profondeur effective dans le cas d'une élévation de niveau due à l'immersion n'est pas rigoureuse. Nous avons tenté expérimentalement de démontrer cette hypothèse.

De plus, aux pages 22 à 28, nous avons montré quelles étaient les possibilités d'interprétation de la densité observée et leur exactitude relative.

Nous envisageons donc, comme interprétation possible :

a) LA PROFONDEUR EFFECTIVE h_B

α) Dans le cas du flotteur réel cylindro-biconique avec immersion permanente (nous avons vu p. 32 que l'élévation du niveau due à l'immersion temporaire modifie la relation logarithmique h, d et que, en conséquence, les équations 30, 31, 32, 33 qui permettent le calcul du plan de profondeur effective dans le cas du cylindro-bicône ne sont plus satisfaites).

β) Dans le cas du cylindre équivalent d'une part avec immersion permanente (équation 27), d'autre part avec immersion temporaire (équation 29).

b) LA PROFONDEUR DE CASAGRANDE H_M

Envisagée au plan médian du cylindre équivalent, pour les deux procédés d'immersion $H_M = 0,5 (h_1 + h_2)$,

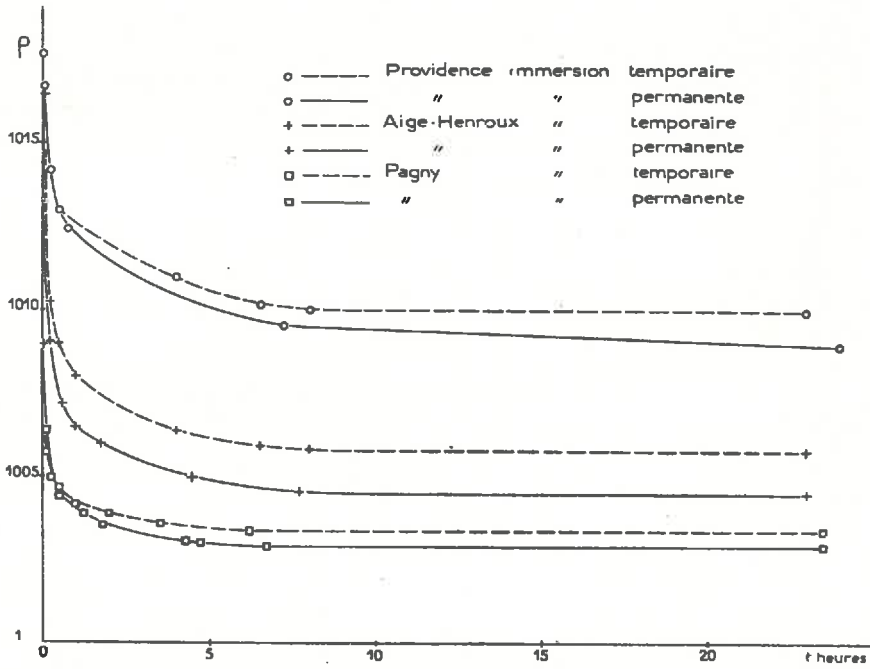
c) LA PROFONDEUR H_B

du Bureau U. S. de Public Roads : $H_B = 0,42 (h_1 + h)$.

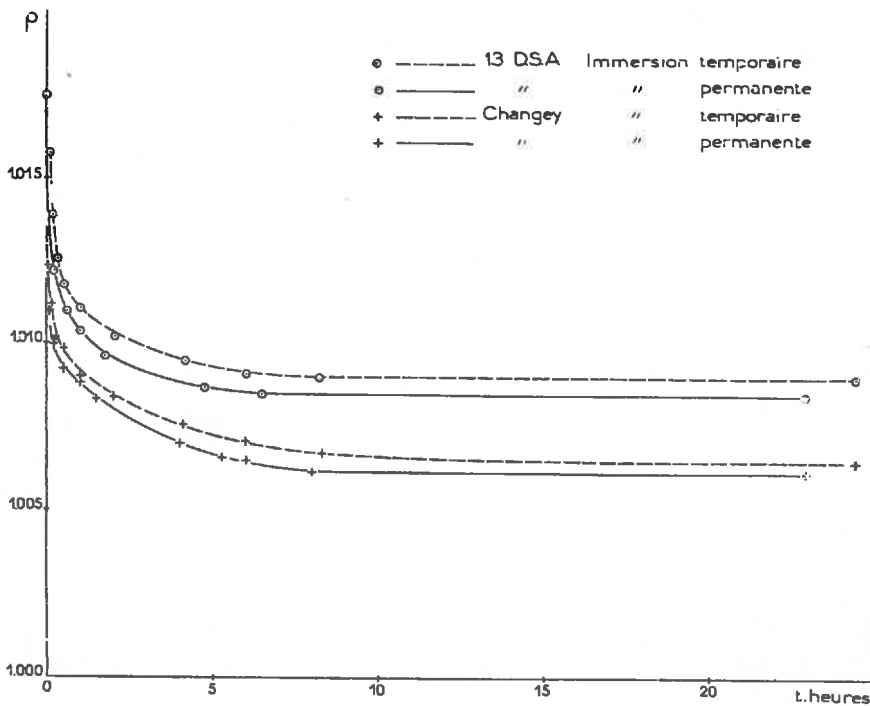
d) LA DENSITÉ MOYENNE D_M

de toute la colonne 0-2, de la surface de la suspension au plan de base du flotteur, calculée par le tracé de la tangente à la courbe d'observation.

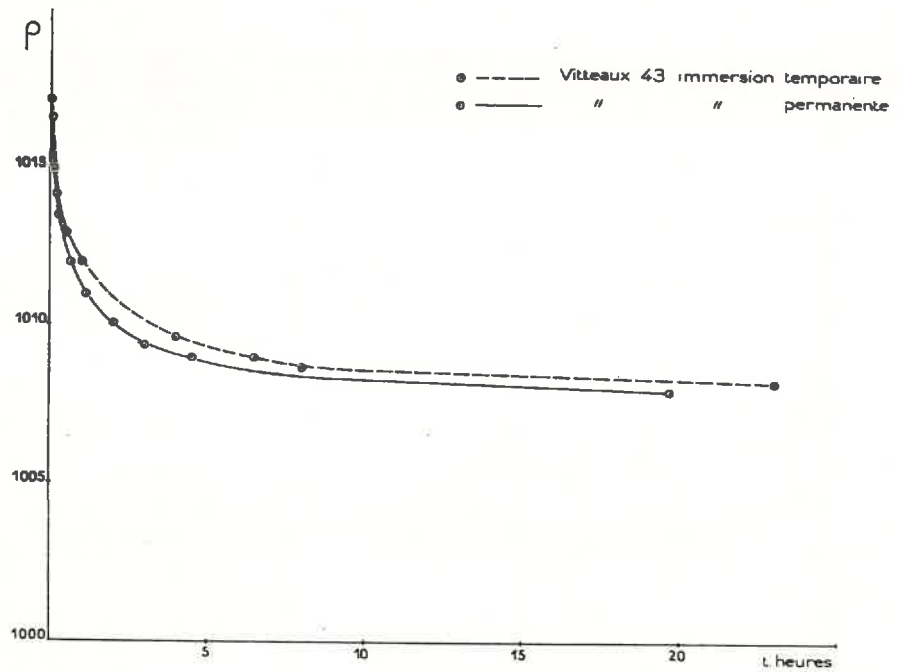
Cette étude comparative a été faite sur les terres suivantes (30 g/l ; 30 cc/l de citrate) : Providence, Vitteaux 43, 13 D. S. A., Changey, Aige Henroux, Pagny.



GRAPHIQUE X.



GRAPHIQUE XI.



GRAPHIQUE XII.

Nous reproduisons (graph. X, XI, XII) les courbes d'observation correspondantes. Les résultats concernant les éléments $< 20\mu <$ et 2μ sont donnés dans les tableaux XXX à XXXV.

TABLEAU XXX

Providence

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|--|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 71,74 | 44,44 | | |
| Immers. perman. cylind. équival. h_B | 72,78 | 41,02 | + 1,45 | — 7,69 |
| Immers. perman. cylindro-bicône h_B | 72,78 | 41,02 | + 1,45 | — 7,69 |
| Immers. tempor. cylindre équiv. h_B | 73,90 | 41,02 | + 3 | — 7,69 |
| Immersion permanente H_M | 72,78 | 41,02 | + 1,45 | — 7,69 |
| Immersion temporaire H_M | 73,90 | 42,71 | + 3 | — 3,89 |
| Immersion permanente H_B | 78,97 | 42,15 | + 10,07 | — 5,15 |
| Immersion temporaire H_B | 78,97 | 42,71 | + 10,07 | — 3,89 |
| Immersion permanente D_M | 80,65 | 53,21 | + 12,42 | + 19,73 |
| Immersion temporaire D_M | 81,77 | 42,71 | + 13,97 | — 3,89 |

TABLEAU XXXI

Vitteaux 43

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|--|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 71,50 | 32,42 | | |
| Immers. perman. cylind. $\acute{e}quiv. h_E$ | 68,73 | 33,98 | - 3,87 | + 1,72 |
| Immers. perman. cylindro-bic\^one h_E | 68,73 | 33,98 | - 3,87 | + 1,72 |
| Immers. tempor. cylind. $\acute{e}quiv. h_E$ | 73,11 | 37,27 | + 2,24 | + 14,96 |
| Immersion permanente H_M | 68,74 | 34,26 | - 3,87 | + 5,43 |
| Immersion temporaire H_M | 72,03 | 37,27 | + 0,73 | + 14,96 |
| Immersion permanente H_B | 73,67 | 36,72 | + 3,03 | + 13,26 |
| Immersion temporaire H_B | 76,96 | 39,46 | + 7,63 | + 21,71 |
| Immersion permanente D_M | 76,41 | 39,46 | + 6,86 | + 21,71 |
| Immersion temporaire D_M | 80,25 | 42,21 | + 12,23 | + 30,2 |

TABLEAU XXXII

I3 D. S. A.

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|--|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 65,31 | 36,05 | | |
| Immers. perman. cylind. $\acute{e}quiv. h_E$ | 62,37 | 35,62 | - 4,50 | - 1,05 |
| Immers. perman. cylindro-bic\^one h_E | 62,57 | 35,62 | - 4,19 | - 1,05 |
| Immers. tempor. cylind. $\acute{e}quiv. h_E$ | 68,14 | 37,85 | + 4,34 | + 4,85 |
| Immersion permanente H_M | 62,01 | 35,63 | - 5,05 | - 1,05 |
| Immersion temporaire H_M | 76,03 | 37,85 | + 2,63 | + 4,85 |
| Immersion permanente H_B | 63,69 | 35,63 | - 2,48 | - 1,05 |
| Immersion temporaire H_B | 73,70 | 37,85 | + 12,84 | + 4,85 |
| Immersion permanente D_M | 70,15 | 35,63 | + 7,28 | - 1,05 |
| Immersion temporaire D_M | 75,71 | 37,85 | + 15,92 | + 4,85 |

TABLEAU XXXIII

Changey

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|--|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 46,48 | 23,07 | | |
| Immers. perman. cylind. $\acute{e}quiv. h_E$ | 49,04 | 22,33 | + 5,50 | - 3,20 |
| Immers. perman. cylindro-bic\^one h_E | 49,04 | 22,33 | + 5,50 | - 3,20 |
| Immers. tempor. cylind. $\acute{e}quiv. h_E$ | 50,13 | 25,06 | + 7,87 | + 8,62 |
| Immersion permanente H_M | 49,04 | 22,33 | + 5,50 | - 3,20 |
| Immersion temporaire H_M | 49,31 | 25,06 | + 6,08 | + 8,62 |
| Immersion permanente H_B | 52,31 | 22,33 | + 12,54 | - 3,20 |
| Immersion temporaire H_B | 53,40 | 25,06 | + 14,88 | + 8,62 |
| Immersion permanente D_M | 48 | 22,33 | + 3,27 | - 3,20 |
| Immersion temporaire D_M | 55,03 | 25,06 | + 18,38 | + 8,62 |

TABLEAU XXXIV

Aige Henroux

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|---------------------------------------|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 46,48 | 14,83 | | |
| Immers. perman. cylind. équiv. h_E | 54,69 | 13,27 | + 17,66 | - 10,52 |
| Immers. perman. cylindro-bicône h_E | 54,69 | 13,27 | + 17,66 | - 10,52 |
| Immers. tempor. cylind. équiv. h_E | 54,77 | 17,87 | + 17,83 | + 20,50 |
| Immersion permanente H_M | 45,01 | 13,54 | - 3,16 | - 8,69 |
| Immersion temporaire H_M | 53,14 | 17,33 | + 14,33 | + 16,85 |
| Immersion permanente H_B | 55,85 | 13,54 | + 20,16 | - 8,69 |
| Immersion temporaire H_B | 63,43 | 18,95 | + 36,47 | + 27,78 |
| Immersion permanente D_M | 58,55 | 13,54 | + 25,97 | - 8,69 |
| Immersion temporaire D_M | 66,68 | 21,12 | + 43,46 | + 42,41 |

TABLEAU XXXV

Pagny

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|---------------------------------------|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 17,92 | 7,03 | | |
| Immers. perman. cylind. équiv. h_E | 17,26 | 4,30 | - 3,67 | - 38,83 |
| Immers. perman. cylindro-bicône h_E | 17,26 | 4,30 | - 3,67 | - 38,83 |
| Immers. tempor. cylind. équiv. h_E | 17,8 | 4,83 | - 0,66 | - 31,29 |
| Immersion permanente H_M | 17,26 | 4,30 | - 3,67 | - 38,83 |
| Immersion temporaire H_M | 17,26 | 4,84 | - 3,67 | - 31,15 |
| Immersion permanente H_B | 21,79 | 4,30 | + 16,01 | - 38,83 |
| Immersion temporaire H_B | 20,71 | 4,84 | + 15,66 | - 31,15 |
| Immersion permanente D_M | 23,67 | 4,30 | + 32,14 | - 38,83 |
| Immersion temporaire D_M | 22,06 | 4,84 | + 23,10 | - 31,15 |

Il découle de l'observation de ces tableaux que les résultats donnés par l'interprétation : h_B cylindro-bicône immersion permanente et h_E cylindre équivalent immersion permanente sont identiques ou extrêmement voisins. Donc le chiffre de 0,95 % que nous avons trouvé page 33, pour l'erreur maxima due au remplacement du cylindro-bicône par le cylindre équivalent est bien un maximum et peut en effet être négligé puisque, expérimentalement, les résultats sont les mêmes dans les deux cas.

Pratiquement, le calcul du plan de profondeur h_B étant plus simple pour le cylindre que pour le cylindro-bicône, nous envisagerons seulement

à l'avenir la profondeur h_E du cylindre équivalent. L'étude des terres suivantes va nous permettre, en ajoutant ces résultats à ceux qui sont consignés dans les tableaux précédents, de comparer plus largement les différentes interprétations et les deux méthodes d'immersion permanente et d'immersion temporaire (les suspensions sont également préparées à partir de 30 g/litre et additionnées de 30 cc/l de citrate de sodium). Les résultats 20μ et 2μ pour *Jailly, Chatillon, 57 D. S. A., Varanges, Molphey, Spoy*, sont consignés dans les tableaux XXXVI à XLI. Les courbes densité-temps correspondant aux suspensions de ces terres sont reproduites dans les graphiques XIII et XIV.

TABLEAU XXXVI

Jailly

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|----------------------------|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 87,4 | 46,8 | | |
| h_E immers. perman. | 85,5 | 48 | — 2,2 | + 2,5 |
| h_E — tempor. | 79,8 | 48 | — 8,7 | + 2,5 |
| H_M — perman. | 85 | 48 | — 2,7 | + 2,5 |
| H_M — tempor. | 80,9 | 48 | — 7,4 | + 2,5 |
| H_B — perman. | 91,7 | 49,1 | + 5 | + 4,9 |
| H_B — tempor. | 85,9 | 49,1 | — 1,7 | + 4,9 |
| D_M — perman. | 96,7 | 50,3 | + 10,7 | + 7,4 |
| D_M — tempor. | 89,9 | 50,3 | + 2,9 | + 7,4 |

TABLEAU XXXVII

Chatillon

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|----------------------------|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 65 | 27,6 | | |
| h_E immers. perman. | 67,4 | 30 | — 0,3 | + 8,7 |
| h_E — tempor. | 72,9 | 38,4 | + 12,1 | + 39,1 |
| H_M — perman. | 65,1 | 30 | + 0,15 | + 8,7 |
| H_M — tempor. | 71,2 | 38,4 | + 9,5 | + 39,1 |
| H_B — perman. | 72,9 | 30 | + 12,1 | + 8,7 |
| H_B — tempor. | 76,8 | 39 | + 18,1 | + 41,3 |
| D_M — perman. | 77,4 | 30,7 | + 19 | + 11,2 |
| D_M — tempor. | 82,4 | 39,5 | + 26,7 | + 43,1 |

TABLEAU XXXVIII

57 D. S. A.

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|---------------------------|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 42,2 | 30,2 | | |
| h_E immers. perman..... | 40,7 | 29,4 | - 3,5 | - 6 |
| h_E — tempor. | 45,4 | 31 | + 7,6 | + 2,6 |
| H_M — perman. | 40,7 | 29,4 | - 3,5 | - 6 |
| H_M — tempor. | 43,1 | 31 | + 2,1 | + 2,6 |
| H_B — perman. | 43,5 | 29,4 | + 3 | - 6 |
| H_B — tempor. | 47,6 | 31 | + 12,7 | + 2,6 |
| D_M — perman. | 46,8 | 29,4 | + 10,9 | - 6 |
| D_M — tempor. | 50,4 | 31 | + 19,4 | + 2,6 |

TABLEAU XXXIX

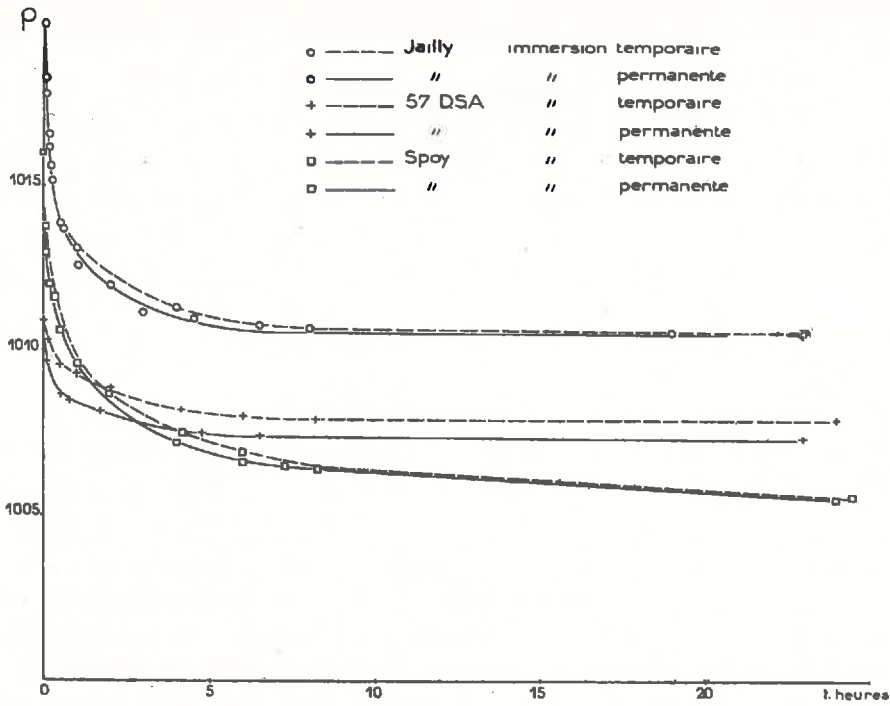
Varanges

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|----------------------------|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 48,2 | 23,8 | | |
| h_E immers. perman. | 47,8 | 22,4 | - 3,3 | - 5,8 |
| h_E — tempor. | 48,8 | 24,7 | - 1,2 | + 3,6 |
| H_M — perman. | 47,8 | 22,4 | - 3,3 | - 5,8 |
| H_M — tempor. | 48,3 | 24,7 | - 2,2 | + 3,6 |
| H_B — perman. | 54,3 | 22,4 | + 12,6 | - 5,8 |
| H_B — tempor. | 54,8 | 24,7 | + 13,7 | + 3,6 |
| D_M — perman. | 60,9 | 22,4 | + 26,3 | - 5,8 |
| D_M — tempor. | 54,3 | 24,7 | + 12,6 | + 3,6 |

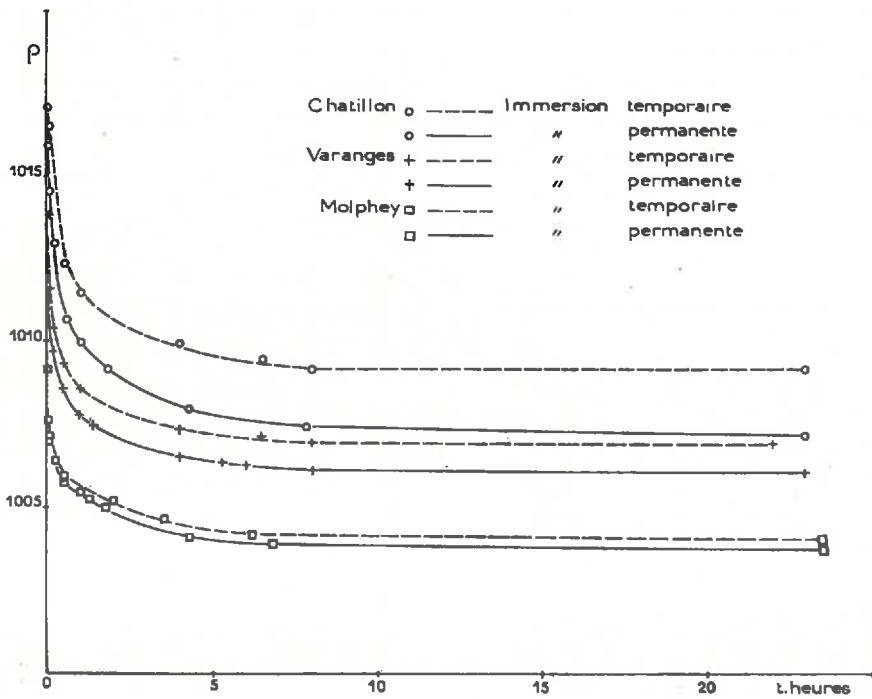
TABLEAU XL

S'poy

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|---------------------------|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 57,4 | 19,6 | | |
| h_E immers. perman..... | 57 | 24,6 | - 0,7 | + 25,5 |
| h_E — tempor. | 58,6 | 24,6 | + 2 | + 25,5 |
| H_M — perman. | 57 | 21,3 | - 0,7 | + 8,6 |
| H_M — tempor. | 56,9 | 21,3 | - 0,9 | + 8,6 |
| H_B — perman. | 61,4 | 23,5 | + 6,9 | + 19,8 |
| H_B — tempor. | 61,2 | 23,5 | + 6,6 | + 19,8 |
| D_M — perman. | 64,7 | 25,6 | + 12,7 | + 30,6 |
| D_M — tempor. | 63,5 | 25,6 | + 10,6 | + 30,6 |



GRAPHIQUE XIII.



GRAPHIQUE XIV.

TABLEAU XLI

Molphey

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|----------------------------|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 25 | 10,1 | | |
| h_E immers. perman. | 24,4 | 9,7 | — 2,4 | — 3,9 |
| h_E — tempor. | 25,4 | 9,7 | + 1,6 | — 3,9 |
| H_M — perman. | 24,4 | 9,7 | — 2,4 | — 3,9 |
| H_M — tempor. | 24,4 | 9,7 | — 2,4 | — 3,9 |
| H_B — perman. | 27,1 | 9,7 | + 8,4 | — 3,9 |
| H_B — tempor. | 27,6 | 9,7 | + 10,4 | — 3,9 |
| D_M — perman. | 28,2 | 9,7 | + 12,8 | — 3,9 |
| D_M — tempor. | 28,2 | 9,7 | + 12,8 | — 3,9 |

Les 12 tableaux précédents montrent les différentes interprétations suivant que l'immersion est permanente ou temporaire. On voit aisément que l'immersion temporaire donne des résultats toujours plus élevés que ceux qui sont obtenus par immersion permanente, à de rares exceptions près, situées dans la phase argileuse pour lesquelles les résultats sont identiques (*Jailly-Spoy-Molphey*). Mais cette constatation ne nous conduit pas à conclure que les résultats donnés par l'immersion temporaire sont moins bons que les autres. Afin de choisir entre les deux procédés, nous avons dressé en tableau les pourcentages d'erreur par rapport à la méthode pipette (les chiffres des colonnes représentent le nombre de terres dont les résultats sont affectés de l'erreur correspondante).

TABLEAU XLII

Sur 12 terres

| | | < 3 % | 3-5 % | 5-6 % | 6-8 % | 8-10 % | > 10 % |
|----------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| h_E immers. perman. | 20 μ | 5 | 5 | 1 | | | 1 |
| h_E — tempor. | 2 μ | 3 | 3 | 2 | | 1 | 3 |
| h_E immers. perman. | 20 μ | 6 | 1 | | 1 | 2 | 2 |
| h_E — tempor. | 2 μ | 2 | 3 | | 1 | 1 | 5 |
| H_M immers. perman. | 20 μ | 5 | 5 | 2 | | | |
| H_M — tempor. | 2 μ | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 |
| H_M immers. perman. | 20 μ | 4 | 3 | | 2 | 2 | 1 |
| H_M — tempor. | 2 μ | 3 | 3 | 1 | | 2 | 3 |
| H_B immers. perman. | 20 μ | 3 | 1 | | 1 | 2 | 5 |
| H_B — tempor. | 2 μ | 1 | 3 | 3 | | 2 | 3 |
| H_B immers. perman. | 20 μ | 2 | 1 | 1 | 1 | | 8 |
| H_B — tempor. | 2 μ | 1 | 5 | | | 1 | 5 |
| D_M immers. perman. | 20 μ | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 |
| D_M — tempor. | 2 μ | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 9 |
| D_M immers. perman. | 20 μ | 1 | | | | | 5 |
| D_M — tempor. | 2 μ | 1 | 3 | 1 | | 1 | 11 |
| D_M immers. perman. | 20 μ | 1 | | | | | 6 |

Par l'examen de ce tableau, on s'aperçoit que la majorité des résultats donnés par l'immersion temporaire est située sur la droite, c'est-à-dire du côté des erreurs les plus élevées, tandis que l'on observe le contraire pour les interprétations h_B et H_M de l'immersion permanente. On peut conclure que, contrairement à ce que la plupart des auteurs préconisent, il est préférable de laisser le densimètre dans la suspension durant toute la sédimentation, car l'erreur pratique dans ce cas est inférieure à l'erreur que l'on fait en introduisant le densimètre pour la mesure.

Quant à l'interprétation la meilleure, il semble déjà, d'après la considération du tableau précédent établi sur 12 terres, qu'elle soit partagée entre h_B et H_M , à l'exclusion des deux autres interprétations. Afin de préciser cette notion d'interprétation optima, nous allons étudier 6 autres suspensions, (résultats tableaux XLIII à XLVIII, graphique XV), ce qui nous permet de comparer les interprétations sur 18 suspensions différentes.

TABLEAU XLIII

Grandes bruyères (immersion permanente)

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|---------------|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 37,6 | 16,3 | | |
| h_B | 36,1 | 19 | - 3,9 | + 16,5 |
| H_M | 35,5 | 19 | - 5,5 | + 16,5 |
| H_B | 37,7 | 19 | + 7,1 | + 16,5 |
| D_M | 38,2 | 19 | + 7,1 | + 16,5 |

TABLEAU XLIV

Vitteaux 30 (immersion permanente)

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|---------------|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 77 | 35,5 | | |
| h_B | 77,9 | 36,2 | + 1,2 | + 1,9 |
| H_M | 77,9 | 36,2 | + 1,2 | + 1,9 |
| H_B | 80 | 39,5 | + 4 | + 11,2 |
| D_M | 81,2 | 39,5 | + 5,4 | + 11,2 |

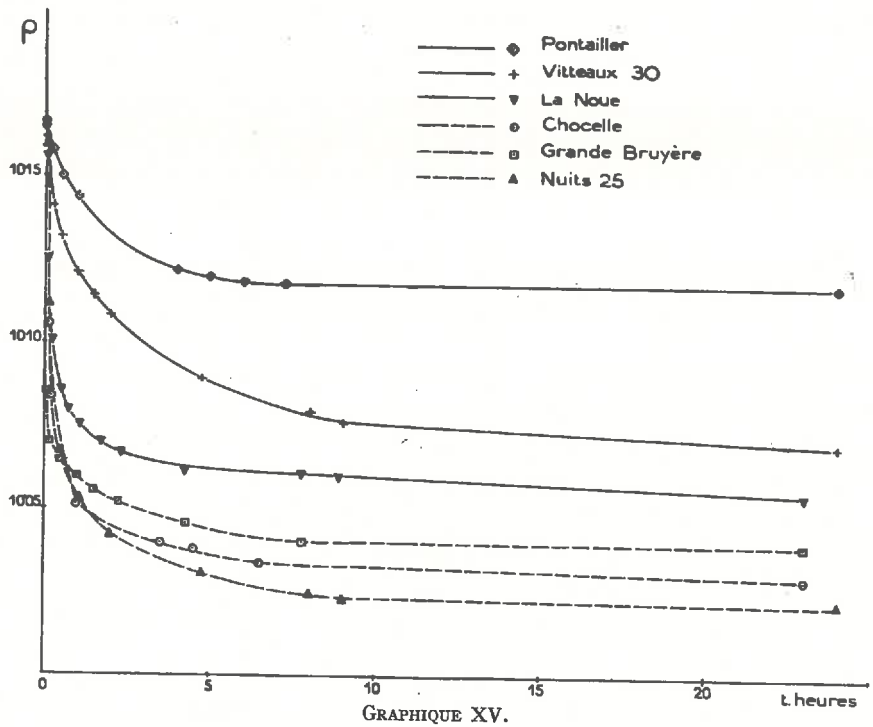


TABLEAU XLV
Chocelle (immersion permanente)

| | 20μ | 2μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|---------------|------|------|---------------------------------|-------|
| | | | 20μ | 2μ |
| Pipette | 49,1 | 14,7 | | |
| h_E | 48,4 | 14,6 | — 1,4 | — 0,7 |
| H_M | 47,3 | 14,6 | — 3,6 | — 0,7 |
| H_B | 59,3 | 14,6 | + 20,8 | — 0,7 |
| D_M | 59,3 | 14,6 | + 20,8 | — 0,7 |

TABLEAU XLVI
Nuits 25 (immersion permanente)

| | 20μ | 2μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|---------------|------|-------|---------------------------------|--------|
| | | | 20μ | 2μ |
| Pipette | 52,1 | 12,45 | | |
| h_E | 51,4 | 9,7 | — 1,3 | — 30,1 |
| H_M | 51,5 | 9,7 | — 1,1 | — 30,1 |
| H_B | 64,5 | 9,7 | + 23,8 | — 30,1 |
| D_M | 64,5 | 9,7 | + 23,8 | — 30,1 |

TABLEAU XLVII

La Noue (immersion permanente)

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|---------------|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 60,2 | 30,3 | | |
| h_E | 61,4 | 28,1 | + 1,9 | - 7,2 |
| H_M | 61,4 | 28,1 | + 1,9 | - 7,2 |
| H_B | 68,6 | 28,1 | + 13,9 | - 7,2 |
| D_M | 71,3 | 28,1 | + 18,4 | - 7,2 |

TABLEAU XLVIII

Pontailier (immersion permanente)

| | 20 μ | 2 μ | $\frac{\Delta P}{P} \times 100$ | |
|---------------|----------|---------|---------------------------------|---------|
| | | | 20 μ | 2 μ |
| Pipette | 75,2 | 57,2 | | |
| h_E | 73,4 | 55,5 | - 2,4 | - 2,9 |
| H_M | 73,4 | 55,5 | - 2,4 | - 2,9 |
| H_B | 72,8 | 55,5 | - 3,1 | - 2,9 |
| D_M | 77,4 | 55,5 | + 2,9 | - 2,9 |

Un tableau de comparaison des pourcentages d'erreur sur les 18 terres étudiées permettra de faire un choix entre les différentes interprétations. (Nous ne retiendrons que les résultats obtenus par immersion permanente).

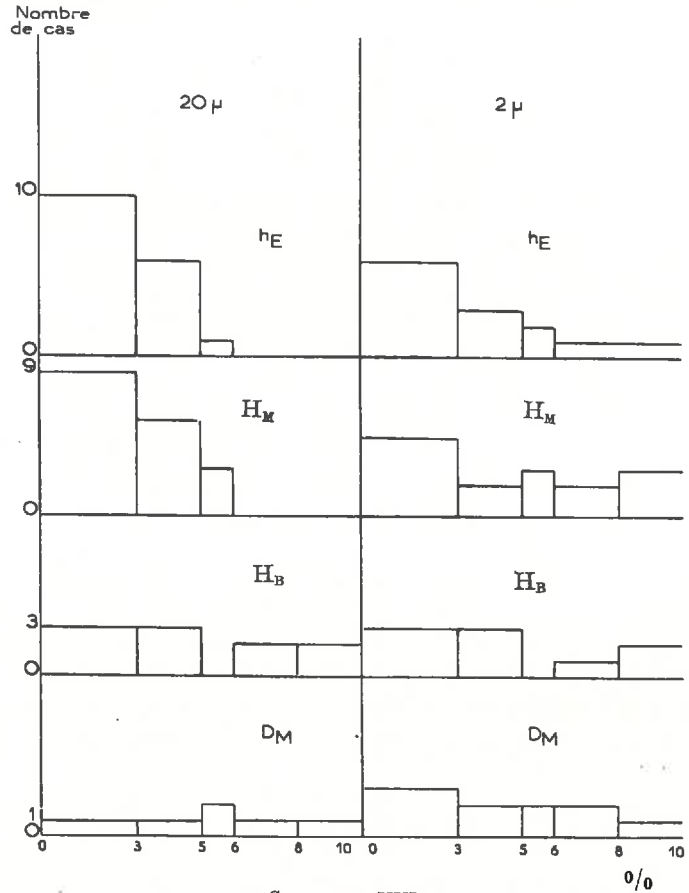
TABLEAU II,

(Sur 18 terres)

| | | < 3 % | 3-5 % | 5-6 % | 6-8 % | 8-10 % | > 10 % |
|-------------|----------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| h_E | 20 μ | 10 | 6 | 1 | | | 1 |
| | 2 μ | 6 | 3 | 2 | 1 | 1 | 5 |
| H_M | 20 μ | 9 | 6 | 3 | | | |
| | 2 μ | 5 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| H_B | 20 μ | 3 | 3 | | 2 | 2 | 8 |
| | 2 μ | 3 | 3 | 3 | 1 | 2 | 6 |
| D_M | 20 μ | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 12 |
| | 2 μ | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 8 |

Ce tableau a permis la construction d'un diagramme (graphique XVI) qui représente le nombre de terres dans chaque fraction du pourcentage

d'erreur. Il est ainsi évident que la meilleure concordance avec la pipette est obtenue au moyen de l'interprétation h_E qui groupe 10 terres sur 18 dont les résultats diffèrent de moins de 3 % avec ceux obtenus par la méthode pipette, pour les particules $< 20\mu$. L'interprétation H_M suit de près avec 9 terres sur 18 dans la même zone d'erreur, tandis que H_B n'en possède que 3 et D_M que 1 qui remplissent ces conditions.



GRAPHIQUE XVI.

Pour les particules $< 2\mu$, la précision par rapport à la méthode pipette est moins bonne et les résultats densimétriques présentent une erreur de moins de 5 % par rapport aux résultats obtenus par la méthode pipette dans 9 terres (sur 18) pour h_E , 7 pour H_M , 6 pour H_B et 5 pour D_M .

Nous pouvons donc conclure, comme l'étude théorique de la première partie nous permettait de le supposer, que les meilleurs résultats sont obtenus par immersion permanente, et par l'interprétation h_E , calculée pour le cylindro-bicône réel ou par le cylindre qui lui est équivalent et qui répond aux conditions de la page 37.

CHAPITRE IV

PRÉCISION DE LA MÉTHODE

I. — Précision de la méthode densimétrique

La méthode consistant à calculer le pourcentage des particules d'un rayon déterminé, l'erreur sera calculée à partir des deux formules qui donnent l'une le rayon, l'autre le pourcentage.

1° ERREUR SUR LA DÉTERMINATION DU RAYON

Le rayon est déterminé d'après une formule dérivée de la loi de STOKES :

$$r = \sqrt{\frac{v}{C}} = \sqrt{\frac{h}{Ct}} = \sqrt{\frac{h}{\frac{2(\rho_s - \rho_l)g \times t}{9\eta}}}$$

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta \eta}{\eta} + \frac{\Delta \rho_s + \Delta \rho_l}{\rho_s - \rho_l} \right]$$

a) Cas des particules de limon = 20 μ .

α) h

La densité de la suspension varie dans la pratique de 1,016 à 1,005, c'est-à-dire que h_E correspondant varie de 17 à 21 cm, h_1 de 9,6 à 12,1 cm, et l'erreur maximum sur h_E est

$$\frac{19 - 18,92}{18,92} = 0,0042$$

De plus, la précision des diagrammes qui donnent h en fonction de ρ est :

$$\frac{19,6 - 19,2}{19,2} = 0,020$$

β) t . Précision des diagrammes :

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{4 \text{ secondes}}{3 \text{ minutes}} = \frac{4}{180} = 0,022$$

γ) η

Suivant la température, la viscosité de l'eau varie de 0,011 111 poises à 16°, à 0,010 050 à 20°.

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = \frac{0,001 061}{0,010 050} = 0,105$$

Or cette erreur est toute théorique puisque dans la pratique on fait une correction de température pour r et pour ρ_1 . Il convient donc de ne pas l'introduire dans le calcul.

δ) $\Delta\rho_s$

La densité du sol est *a priori* erronée en raison de l'incorrection de la formule de STOKES dans laquelle on assimile la particule de forme irrégulière à une sphère de rayon équivalent. En effet, comme nous l'avons vu, seule la notion de vitesse de chute est correcte ; la considération du rayon est inexacte et entraîne comme conséquence l'inexactitude de ρ_s . Il convient donc de ne pas l'introduire dans le calcul d'erreur.

ρ_1 varie de 1,00042 à 1,0004

$$\frac{\Delta\rho_1}{\rho_1} = \frac{0,00002}{1,0004} = 0,000019$$

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{1}{2} [0,0200 + 0,022 + 0,000019] = 0,0211$$

b) CAS DES PARTICULES D'ARGILE = 2μ .

α) h

varie de 1,010 à 1,001

h_B varie de 19,6 à 23,6.

L'erreur faite sur h_B en utilisant le cylindre de hauteur $H = 10,57$ cm est pratiquement nulle dans cette zone.

Il reste l'erreur faite par la lecture du diagramme :

$$\frac{0,4}{19,6} = 0,0200$$

β) t

$$\text{d'où} \quad \frac{\Delta t}{t} = \frac{10 \text{ minutes}}{14 \text{ h } 30} = \frac{10}{870} = 0,011$$

γ) et δ) restent semblables

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{1}{2} [0,02 + 0,011 + 0,000019] = 0,01551$$

2° ERREUR SUR LA FORMULE DU POURCENTAGE

$$P = \frac{100V'}{x} \cdot \frac{\rho_s(\rho - \rho_e)}{\rho_s - \rho_e}$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta V'}{V'} + \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta\rho - \Delta\rho_1}{\rho - \rho_1} + \frac{\Delta\rho_1}{\rho_1}$$

a) *erreur sur V'*

Le volume total est 1000 cc que l'on apprécie à 5 cc près :

$$\frac{\Delta V'}{V'} = \frac{5}{1000} = 0,005$$

b) *erreur sur x*

x = prise d'essai = 30 g

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{0,0015}{30} = 0,000033$$

c) *erreur sur ρ_1*

$$\frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} = \frac{0,00002}{1,0004} = 0,000019$$

$$d) \frac{\Delta \rho - \Delta \rho_1}{\rho - \rho_1}$$

$$\Delta \rho = 0,00025$$

$\alpha)$ 20 μ

$$\frac{0,00025 - 0,00002}{1,010 - 1,0004} = \frac{0,00023}{0,0096} = 0,024$$

$\beta)$ 2 μ

$$\frac{0,00025 - 0,00002}{1,005 - 1,0004} = \frac{0,00023}{0,0046} = 0,05$$

Erreur sur P

$\alpha)$ 20 μ

$$\frac{\Delta P}{P} = 0,005 + 0,000033 + 0,024 = 0,029$$

$\beta)$ 2 μ

$$\frac{\Delta P}{P} = 0,005 + 0,000033 + 0,05 = 0,055$$

L'erreur sur le rayon accroît l'erreur sur le pourcentage telle que nous l'avons calculée par la formule du paragraphe 2. Pour trouver la nouvelle erreur, il convient de construire sur la courbe expérimentale, un rectangle dont le centre est situé sur la courbe et dont les côtés sont : en ordonnée $\frac{\Delta P}{2P}$ et en abscisse $2\frac{\Delta r}{r}$. Le tracé des deux courbes extrêmes détermine l'erreur globale sur P. Nous avons fait ces constructions sur deux sols de composition différente : *Aige Henroux* (limon + argile = 45,04 % argile = 14,66 %) et *Vitteaux 43* (limon + argile = 67,12 % ; argile = 33,18 %).

$$\frac{\Delta P}{P} \text{ global} = 0,045 \text{ (limon + argile) } Aige \text{ Henroux}$$

$$0,045 \text{ (limon + argile) } Vitteaux \text{ 43}$$

$$0,056 \text{ (argile) } Aige \text{ Henroux}$$

$$0,057 \text{ (argile) } Vitteaux \text{ 43}$$

On voit donc que, en définitive, la détermination du limon est plus précise que la détermination de l'argile, bien que cette dernière ne soit pratiquement pas influencée par l'erreur faite sur le rayon à cause de la pente faible de la courbe ρ, t dans cette zone.

Au contraire, pour la somme limon + argile, la courbe étant très abrupte, l'erreur sur P sera d'autant plus influencée par l'erreur sur r que la pente sera plus forte, c'est-à-dire que la terre renfermera moins de la somme limon + argile.

Comme notre méthode de référence au cours de ce travail a toujours été la méthode pipette, il convient que nous comparions les erreurs des deux méthodes.

II. — Précision de la méthode pipette

1° SUR LE RAYON

$$a) \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,2}{10} = 0,02$$

$$b) \frac{\Delta t}{t} =$$

$$\alpha) 20\mu$$

$$\frac{5 \text{ sec.}}{5 \text{ min.}} = \frac{5}{300} = 0,016$$

$$\beta) 2\mu$$

$$\frac{5 \text{ min.}}{8h.} = \frac{5}{480} = 0,010$$

$$c) \frac{\Delta \rho}{\rho} \text{ est le même que dans la méthode densimétrique et égal à } 0,000019$$

$$\alpha) 20\mu$$

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{1}{2} [0,02 + 0,016 + 0,000019] = \mathbf{0,018}$$

$$\beta) 2\mu$$

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{1}{2} [0,02 + 0,010 + 0,000019] = \mathbf{0,015}$$

2° SUR LE POURCENTAGE

$$P = \frac{100.000(p - p')}{vx}$$

p = masse de particules

p' = masse de citrate de sodium

x = prise d'essai = 30 g

v = volume prélevé = 20 cc

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta p + \Delta p'}{p - p'} + \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta x}{x}$$

$$a) \frac{\Delta x}{x} = \frac{0,001}{30} = 0,00003$$

$$b) \frac{\Delta v}{v} = \frac{0,1}{20} = 0,005$$

c) p' = (1 litre contient 1,19 g de citrate de sodium)
(20 cc contiennent 0,024 g de citrate de sodium)

$$p' = 0,024$$

$$\Delta p' = 0,001$$

d) p

$\alpha) 20\mu$.

Pour $P = 50\%$, $p = 0,3 - 0,024 = 0,276$
 $\Delta p = 0,001$

$\beta) 2\mu$.

Pour $P = 20\%$, $p = 0,120 \text{ g} - 0,024 \text{ g} = 0,096 \text{ g}$
 $\Delta p = 0,001$

Valeur de $\frac{\Delta p}{p}$

$\alpha) 20\mu$

$$\frac{\Delta p + \Delta p'}{p - p'} = \frac{0,001 + 0,001}{0,276 - 0,024} = \frac{0,002}{0,252} = 0,008$$

$$\frac{\Delta P}{P} = 0,000033 + 0,005 + 0,008 = \mathbf{0,013}$$

$\beta) 2\mu$

$$\frac{\Delta p + \Delta p'}{p - p'} = \frac{0,001 + 0,001}{0,096 - 0,024} = \frac{0,002}{0,072} = 0,027$$

$$\frac{\Delta P}{P} = 0,000033 + 0,005 + 0,027 = \mathbf{0,032}$$

L'influence de $\frac{\Delta r}{r}$ sur $\frac{\Delta P}{P}$ définitif se calcule par la même construction que dans la méthode densimétrique sur la courbe P, r que l'on peut construire à partir des données expérimentales.

Dans le cas de *Aige Henroux*, nous obtenons :

$$20\mu \frac{\Delta P}{P} = 0,035$$

$$2\mu \frac{\Delta P}{P} = 0,035.$$

Pour *Vitteaux* 43 :

$$20\mu \frac{\Delta P}{P} = 0,025$$

$$2\mu \frac{\Delta P}{P} = 0,035.$$

Comparaison des deux méthodes

$$\text{Aige Henroux : } 20\mu : \frac{\Delta P}{P} \text{ (densimètre) } - \frac{\Delta P}{P} \text{ (pipette) } = 0,01$$

$$2\mu : \frac{\Delta P}{P} \text{ (densimètre) } - \frac{\Delta P}{P} \text{ (pipette) } = 0,020.$$

$$\text{Vitteaux 43 : } 20\mu : \frac{\Delta P}{P} \text{ (densimètre) } - \frac{\Delta P}{P} \text{ (pipette) } = 0,015$$

$$2\mu : \frac{\Delta P}{P} \text{ (densimètre) } - \frac{\Delta P}{P} \text{ (pipette) } = 0,022.$$

Le calcul montre que la méthode densimétrique présente par rapport à la méthode pipette une erreur de 1 à 2 % pour la somme limon + argile et voisine de 2 % pour l'argile.

III. — Reproductibilité de la méthode et probabilité d'erreur

Le calcul d'erreur qui vient d'être fait se rapporte à une erreur théorique maxima. Dans la pratique, cette erreur théorique est rarement atteinte, mais par contre, certains facteurs incalculables ne peuvent intervenir dans le calcul théorique : ce sont en particulier les irrégularités de dispersion que nous supposons diminuées par la méthode de dispersion que nous avons adoptée, mais qui certainement ne sont pas nulles. D'autre part, nous avons trouvé pour la méthode de la pipette une erreur théorique inférieure à celle de la méthode densimétrique, mais dans le 1^{er} cas, l'introduction de la pipette par exemple, en créant une légère perturbation de la suspension, affecte probablement la précision.

En conséquence, le seul renseignement qui corresponde vraiment à la réalité ne peut être obtenu que par une série de mesures faites sur des suspensions préparées suivant la même technique.

1) *Précision des résultats concernant les éléments* $\leq 20\mu$. — Nous avons procédé sur la terre de *Chocelle*, à $n = 13$ déterminations successives comportant le somme des éléments $< 20\mu$. Nous avons obtenu les résultats suivants : 45,46-47,2-48-48,3-48,4-48-9,-48,8-48,96-49-49,4-49,6-50,8.

Nous avons à l'aide de ces données, déterminé la moyenne \bar{X} et l'écart-type s , à partir de la variance s^2 donnée par la formule :

$$s^2 = \frac{\sum X_1^2 - \frac{(\sum X_1)^2}{n}}{n - 1}$$

$$\bar{X} = 48,52$$

$$s^2 = 1,58$$

$$s = 1,25.$$

D'après la table de détermination de t de FISCHER, nous avons établi la probabilité d'erreur, représentée dans le tableau suivant (L) où P est le nombre de chances sur 100 pour que le résultat soit compris entre \bar{X} et $\bar{X} \pm ts$.

TABLEAU L

| P | t | ts | $\bar{X} \pm ts$ |
|----|-------|-------|-----------------------------------|
| 95 | 2,16 | 2,7 | $48,52 \pm 2,7$ ($\pm 5,5\%$) |
| 90 | 1,771 | 2,21 | $48,52 \pm 2,21$ ($\pm 4,5\%$) |
| 80 | 1,350 | 1,69 | $48,52 \pm 1,69$ ($\pm 3,6\%$) |
| 70 | 1,079 | 1,348 | $48,52 \pm 1,348$ ($\pm 2,7\%$) |
| 50 | 0,694 | 0,867 | $48,52 \pm 0,867$ ($\pm 1,7\%$) |
| 10 | 0,128 | 0,16 | $48,52 \pm 0,16$ ($\pm 0,3\%$) |

Nous voyons donc que, en tenant compte des erreurs extrêmes qui peuvent se produire sur l'ensemble des déterminations et qui peuvent en partie être attribuées à la dispersion, dans 9 cas sur 10, l'erreur serait inférieure à 4,5 % et dans 7 cas sur 10, inférieure à 2,7 %.

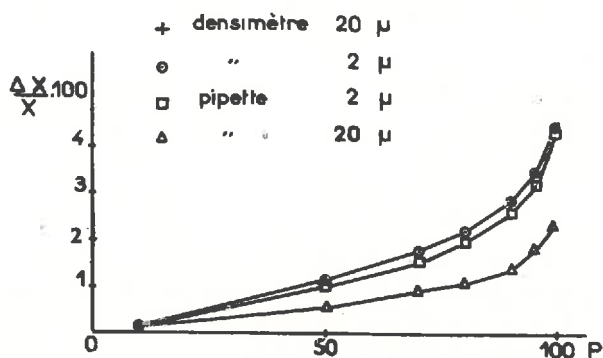
2) *Précision des résultats concernant les éléments $\leq 20 \mu$ et $\leq 2 \mu$.* — Sur un limon rouge de DAROIS, R. N. 71, nous avons fait une série de mesures sur 30 suspensions identiquement préparées ($n = 30$). Nous avons comparé la précision de la méthode densimétrique et de la méthode de la pipette pour les particules de grosseur maxima égale à 20μ et 2μ . Les valeurs données dans le tableau ci-dessous (LI) traduisent la relation entre P et l'erreur relative.

TABLEAU LI

| P | densimètre | | | | pipette | | | |
|----|------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|
| | 20 μ | | 2 μ | | 20 μ | | 2 μ | |
| | $\bar{X} \pm ts$ | $\frac{\Delta X}{\bar{X}} \cdot 100$ | $\bar{X} \pm ts$ | $\frac{\Delta X}{\bar{X}} \cdot 100$ | $\bar{X} \pm ts$ | $\frac{\Delta X}{\bar{X}} \cdot 100$ | $\bar{X} \pm ts$ | $\frac{\Delta X}{\bar{X}} \cdot 100$ |
| 99 | $77,31 \pm 3,40$ | 4,4 | $58,31 \pm 2,60$ | 4,4 | $77,84 \pm 1,80$ | 2,3 | $58,23 \pm 2,48$ | 4,3 |
| 95 | 2,59 | 3,4 | 1,98 | 3,4 | 1,34 | 1,8 | 1,84 | 3,2 |
| 90 | 2,17 | 2,8 | 1,66 | 2,8 | 1,11 | 1,4 | 1,53 | 2,6 |
| 80 | 1,69 | 2,2 | 1,29 | 2,2 | 0,86 | 1,1 | 1,18 | 2 |
| 70 | 1,37 | 1,75 | 1,045 | 1,8 | 0,69 | 0,9 | 0,95 | 1,6 |
| 50 | 0,89 | 1,15 | 0,68 | 1,16 | 0,45 | 0,6 | 0,615 | 1,05 |
| 10 | 0,16 | 0,2 | 0,126 | 0,2 | 0,08 | 0,1 | 0,114 | 0,2 |

L'étude de ce tableau et des courbes du graphique XVII qui l'illustrent montre que l'erreur faite avec le densimètre est la même pour 20 et 2μ , et voisine de l'erreur faite avec la pipette pour 2μ . Quant à la précision donnée par la méthode de la pipette pour 20μ , elle est supérieure à celle de la méthode densimétrique. Malgré cette différence, l'erreur qui affecte la méthode densimétrique est toujours inférieure à 4,5 % pour les particules de 20μ et de 2μ (25).

3) *Précision des résultats concernant les éléments $\leq 20\mu$, $\leq 2\mu$, $\leq 1\mu$ et $\leq 0,8\mu$.* — Sur le même matériau (*Darois RN 71*) nous avons fait par densimétrie des essais de reproductibilité concernant les parties fines jus-



GRAPHIQUE XVII.

qu'à $0,8\mu$ à l'aide de 10 suspensions ($n = 10$). Le tableau LII ci-dessous établit la relation entre P et $\frac{\Delta X}{X} \cdot 100$ pour des particules de diamètres maxima égaux à 20μ , 2μ , 1μ et $0,8\mu$.

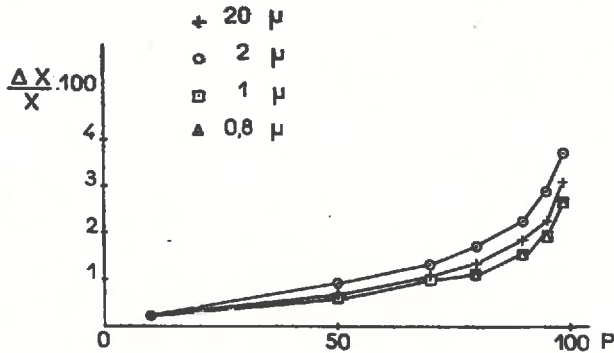
TABLEAU LII

| P | 20 μ | 2 μ | 1 μ | 0,8 μ |
|----|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | $\frac{\Delta X}{X} \cdot 100$ | $\frac{\Delta X}{X} \cdot 100$ | $\frac{\Delta X}{X} \cdot 100$ | $\frac{\Delta X}{X} \cdot 100$ |
| 99 | 3,04 | 3,70 | 2,69 | 2,57 |
| 95 | 2,14 | 2,82 | 1,89 | 1,79 |
| 90 | 1,74 | 2,16 | 1,54 | 1,46 |
| 80 | 1,31 | 1,63 | 1,16 | 1,10 |
| 70 | 1,05 | 1,29 | 0,92 | 0,90 |
| 50 | 0,67 | 0,83 | 0,60 | 0,57 |
| 10 | 0,12 | 0,14 | 0,09 | 0,10 |

Cette même relation est traduite dans le graphique XVIII à l'aide duquel on voit que l'erreur est la même pour 1μ et $0,8\mu$ et que pour 20μ et 2μ elle est un peu supérieure, mais ne dépasse pas 3,7 %.

Les valeurs trouvées antérieurement pour 20μ et 2μ avec un nombre d'essais égal à 30 étaient un peu supérieures à celles-ci. Néanmoins, on peut dire que la précision pour toutes les particules dont les dimensions vont de 20 à $0,8\mu$ est du même ordre de grandeur et certainement toujours inférieure à 4,5 %.

En conclusion, la méthode densimétrique est comparable au point de vue de la précision à la méthode de la pipette. Ces résultats sont d'ailleurs en accord avec ceux que VIGH DJORDJE (26) a trouvés sur des sols de la Voivodina (Yougoslavie) en comparant la méthode aréométrique de CASA-



GRAPHIQUE XVIII.

GRANDE avec la méthode de la pipette. Comme nous avons montré dans notre étude théorique et page 182 expérimentalement que l'interprétation h_B immersion permanente que nous avons adoptée était préférable à toute autre et même à l'interprétation CASAGRANDE, il s'ensuit que notre précision par rapport à la méthode de la pipette est meilleure que celle estimée suffisante de VIGH DJORDJE.

CHAPITRE V

DESCRIPTION DE LA MÉTHODE

N. B. — INUTILITÉ DE LA CORRECTION DE FORME

Les densimètres étant des appareils soufflés, leurs dimensions ne sont pas absolument identiques : il en découle des variations de la profondeur effective h_B (profondeur du plan dans lequel au temps t les particules de vitesse $\leq \frac{h_B}{t}$ ont une masse spécifique exactement égale à celle qui est indiquée par la tige). Afin d'éviter l'établissement d'une courbe d'interprétation par appareil, nous avons pris comme type un densimètre pour lequel h_B correspondant à $\rho = 1,010$ est égal à 18,88 cm. Il convenait d'établir s'il y avait lieu de corriger la profondeur effective de chaque densimètre en fonction du densimètre-type. Dans ce but, nous avons procédé aux opérations suivantes :

a) CALCUL DE h_n POUR CHAQUE DENSIMÈTRE

Détermination : α) de la hauteur L , du cylindre équivalent au flotteur réel :

volume du flotteur réel : $V = V_1 + V_2 + V_3$

V_1 = volume du cône inférieur

V_2 = volume du cylindre médian

V_3 = volume du cône supérieur

$$V_1 = h_1 \frac{\pi}{3} (R^2 + r^2 + Rr)$$

$$V_2 = h_2 \pi R^2$$

$$V_3 = h_3 \frac{\pi}{3} (R^2 + r^2 + Rr)$$

où

h_1 = hauteur du cône inférieur

h_2 = hauteur du cylindre médian

h_3 = hauteur du cône supérieur

La hauteur L , du cylindre équivalent est donnée par la formule :

$$L = \frac{V}{\pi R^2}$$

β) Du centre de volume C du flotteur réel mesuré depuis la valeur $\rho = 1,010$ prise comme origine 0.

$$OC = \frac{V_1 H_1 + V_2 H_2 + V_3 H_3}{V}$$

où :

H_1 = distance de 0 au centre de volume du cône inférieur,

H_2 = distance de 0 au centre de volume du cylindre médian,

H_3 = distance de 0 au centre de volume du cône supérieur.

Le cylindre équivalent est tel que son centre de volume corresponde à celui du flotteur réel.

γ) De la profondeur effective h_n (pour $\rho = 1,010$.)

Elle est donnée par la formule

$$\log_{10} h_n = \frac{h_2 \log_{10} h_2 - h_1 \log_{10} h_1}{L} - \log_{10} e$$

où :

h_1 = distance de 0 (plan correspondant à $\rho = 1,010$) à la partie supérieure du cylindre équivalent,

h_2 = distance de 0 (plan correspondant à $\rho = 1,010$) à la partie inférieure du cylindre équivalent.

b) Les densimètres que nous avons étalonnés, au nombre de 18, présentent des variations de h_n inférieures à ± 1 cm, par rapport à h_n du densimètre-type. Est-il opportun de tenir compte de ces variations ?

$\alpha) d = 50\mu :$

Le temps de chute de ces particules est :

1 min. 24 sec. sous une hauteur de 18,88 cm

1 min. 20 sec. sous une hauteur de 18,88 — 1 cm.

$\beta) d = 20\mu :$

$t = 8$ min. 35 sec. sous 18,88 cm

8 min. 5 sec. sous 18,88 — 1 cm.

$\gamma) d = 2\mu :$

$t = 14$ h 18 min. sous 18,88 cm

13 h 20 min. sous 18,88 — 1 cm.

La différence entre la densité correspondant à $h_E = 18,88$ cm et la densité correspondant à $h_E = 18,88 - 1$ cm, n'est pratiquement pas appréciable.

L'on peut donc, pour une variation de la profondeur effective de l'ordre de 1 cm, éviter toute correction de forme, ce qui simplifie l'application de la méthode.

A. — Corrections à faire intervenir dans le calcul des résultats

1) CORRECTION DE GRADUATION

La graduation étant faite par introduction d'une échelle imprimée sur papier, il est possible que l'échelle se trouve quelque peu décalée par rapport aux densités réelles. Ceci est sans importance puisque dans la formule de calcul du pourcentage de particules, on retranche la masse spécifique du liquide vide de la masse spécifique de la suspension (les erreurs s'annulent). *Il suffit de mesurer pour chaque densimètre la masse spécifique de la solution dispersive à la température de 20°.*

2) CORRECTION DE PROFONDEUR

Comme le densimètre s'enfonce au cours de la sédimentation (ex. : h_E du densimètre-type pour : 1,001 = 22,5 cm et 1,019 = 15 cm), il est absolument indispensable de tenir compte de la variation du plan de profondeur effective.

Le plan de profondeur effective est donc lié à la valeur de ρ . Comme d'autre part, pour des particules de grosseur donnée, le temps de chute varie avec la hauteur de chute (= profondeur effective h_E), nous avons représenté cette double variation pour le densimètre-type à la température de 20° par une courbe ρ, t pour chaque limite de diamètre de particules de l'échelle d'ATTERBERG 50 — 31,5 — 20 — 12,5 — 8 — 5 — 3,15 — 2 — 1,25 — 0,8 — 0,5 μ . (graphique XX). (L'avantage de cette échelle réside dans la possibilité de la transformer en échelle à intervalle arithmétique en

substituant aux valeurs du diamètre leur logarithme décimal. Les courbes cumulatives et les histogrammes seront construits d'après ces valeurs.)

On conçoit que l'intersection de la droite $\rho, t 20^\circ$ correspondant à un diamètre donné, et de la courbe expérimentale, donne la valeur exacte de ρ pour le diamètre envisagé.

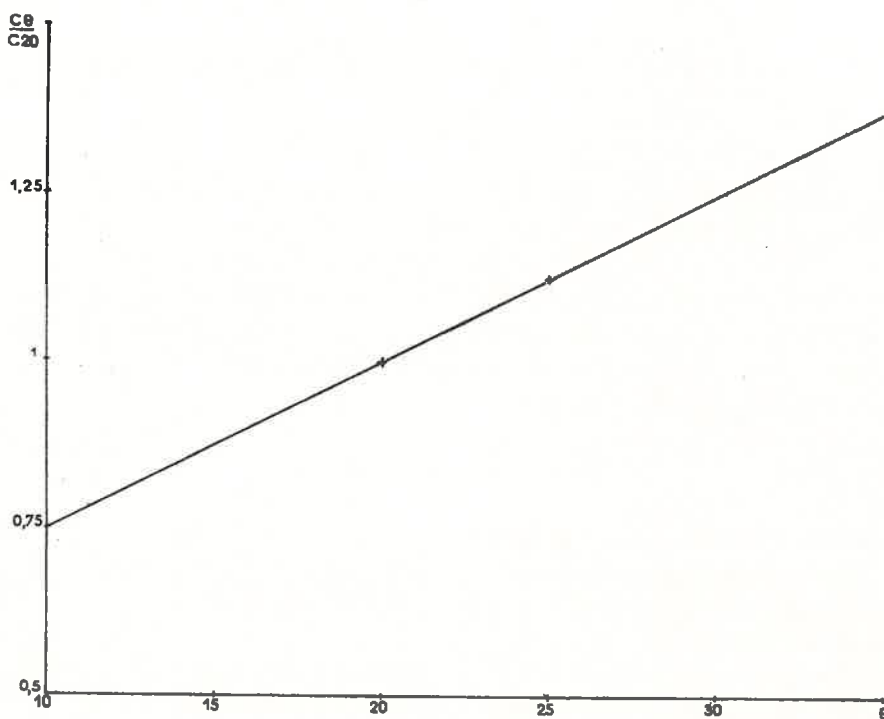
3° CORRECTION DE MÉNISQUE

Etant donnée l'opacité de la suspension, la lecture de la densité se fait au sommet du ménisque. Il convient d'ajouter à la valeur trouvée la quantité correspondant à la hauteur du ménisque, soit 0,0003.

4° CORRECTION DE TEMPÉRATURE

La température influe :

a) sur le verre de l'appareil



GRAPHIQUE XIX.

b) sur la masse spécifique de la solution dispersive

c) sur la vitesse de chute des particules.

Les corrections a) et b) se feront d'après une échelle utilisée par J. BOURCART (graphique XXI).

La correction c) est indispensable dans les premières heures de la sédimentation qui correspondent à une courbe expérimentale ρ, t abrupte. On peut la négliger par la suite. Elle se fera de la façon suivante :

On calculera le temps de chute t^{20° après lequel, à la température de 20° , la masse spécifique serait égale à la masse spécifique observée au temps t^θ et à la température θ . Pour un rayon de particules déterminé et une hauteur de chute donnée, le produit Ct de la constante de STOKES par le temps de chute est constant : $\frac{C^\theta}{C_{20^\circ}} = \frac{t_{20^\circ}}{t^\theta}$. Nous avons construit la droite représentative de la variation de $\frac{C^\theta}{C_{20^\circ}}$ en fonction de θ (graphique XIX). Il suffit donc pour avoir t_{20° de multiplier t^θ par l'ordonnée du point d'abscisse θ .

B. — Mode opératoire

1° DISPERSION

Prise d'essai : 30 g (cette quantité peut être réduite à 20 g dans le cas de terres ou sédiments très argileux).

Destruction de la matière organique s'il y a lieu par action de l'eau oxygénée au bain-marie.

Filtration suivie de lavages à l'eau distillée.

Agitation de une heure en présence de citrate ou pyrophosphate de sodium (30 cc d'une solution normale par litre pour 30 g de terre — 20 cc pour 20 g).

2° MANIPULATION DENSIMÉTRIQUE

Introduire la suspension dans une éprouvette de 1 litre de dimensions convenables. Compléter avec de l'eau distillée.

Agiter par retournement. Faire démarrer le chronomètre ($t = 0$) quand l'éprouvette est déposée sur la paillasse.

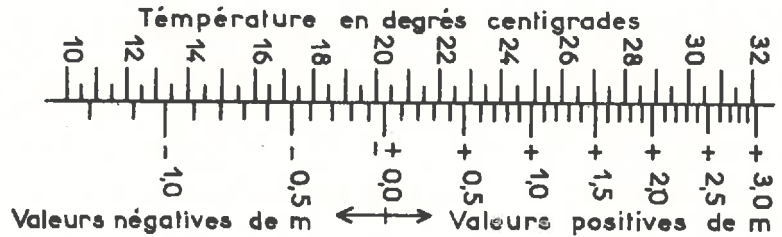
Introduire le densimètre et à l'aide d'un guide éviter qu'il ne se colle aux parois.

Faire les lectures par exemple aux temps suivants : 30 sec., 1 — 2 — 3 — 6 — 9 — 12 — 15 — 21 — 30 — 45 min. — 1 heure — 1 h. 1/2 — 2 h — ..., puis de plus en plus rarement, à partir de 8 heures.

3° CALCUL DES RÉSULTATS

a) Construire la courbe expérimentale ρ, t à l'échelle variable des diagrammes r, t_{20° du transparent (les traits verticaux représentent les changements d'échelle).

N. B. — Pour représenter le début de la sédimentation (environ jusqu'à 4 h) porter sur l'axe des abscisses, non pas les valeurs de $t\theta$ telles qu'on les a mesurées, mais les valeurs correspondantes de t_{20° obtenues en multipliant $t\theta$ par $\frac{C\theta}{C_{20^\circ}}$ (voir le graphique XIX).



GRAPHIQUE XXI.

Tableau pour la détermination de l'influence de la température.

b) Superposer le transparent à la courbe (graph. XX) (à la même échelle). Noter pour chaque limite de diamètre l'ordonnée ρ de l'intersection des deux courbes.

c) Faire sur ρ la correction suivante : ménisque = + 0,0003.

d) Appliquer la formule suivante qui donne le pourcentage P (pour 1 litre) :

$$P = \frac{100\rho[(\rho_s - \rho_l)10^3 + m]}{X(\rho_s - \rho_l)}$$

où :

X = prise d'essai

ρ_s = masse spécifique du solide (2,65)

ρ_l = masse spécifique du liquide de dispersion à 20°

m = correction de température donnée par l'échelle (graph. XXI).

Pour X = 30 g, cette formule se réduit à

$$P = 5,353[(\rho - \rho_l)10^3 + m]$$

Exemple. — Valeurs observées :

| 15° | t_{15° | $t_{20^\circ}(= t_{15^\circ} \times 0,9)$ |
|------------|----------------|---|
| 1,0115 | 9 mn | 8 mn 6 sec |
| 1,0108 | 14 mn | 12 mn 36 sec. |

L'intersection de ce tronçon de la courbe expérimentale avec le diagramme ρt_{20° de 20μ donne la valeur de

$$\begin{aligned} \rho &= 1,01085 \\ \text{correction de ménisque} &= + 0,0003 \\ \rho \text{ corrigé} &= 1,01115 \\ \rho_l 20^\circ &= 1,0012 \\ m &= - 0,77 \\ P &= 5,353[(1,01115 - 1,0012)10^3 - 0,77] \\ &= 57,35 \% \end{aligned}$$

CHAPITRE VI

Applications de la méthode

Nous avons voulu illustrer la méthode densimétrique par l'étude granulométrique continue de quelques sols-types et sédiments.

Les sols-types sont : un sol brun argileux cultivé dans la plaine alluviale de la Saône : La Noue,

— un sol brun lessivé cultivé sur limon rouge : Nuits 25.

les sédiments étudiés sont : deux marnes pliocènes à 20 % de calcaire chacune et originaires l'une de Saint-Marcel-d'Ardèche, l'autre de Théziers,

— deux marnes sableuses à Foraminifères, l'une pliocène : Millas, à 19 % de calcaire, l'autre domérienne (toarcienne) à 43 % de calcaire, issue de Bligny-sur-Ouche ;

— une argile de décalcification : Lux.

Les deux sols ont été dispersés en présence du calcaire, tandis que pour les sédiments, sauf le dernier, le calcaire a été détruit par action de $\text{ClH}(\text{N}/5)$.

La courbe continue et l'histogramme qui lui correspond ont été établis pour ces différents matériaux d'après les valeurs de pourcentage calculées pour 50 — 31,5 — 20 — 12,5 — 8 — 5 — 3,15 — 2 — 1,25 — 0,8 — et 0,65 μ cette dernière dimension paraissant être la limite inférieure du diamètre pour laquelle la valeur obtenue puisse être considérée comme sûre. En effet, des dimensions plus faibles requièrent pour être atteintes, des durées telles qu'il est possible qu'un phénomène de floculation spontanée se produise et fausse les résultats.

La dimension maxima des particules est 50 μ . A la rigueur, la limite de 80 μ pourrait être atteinte, mais on ne peut garantir l'exactitude du pourcentage pondéral des particules qui lui correspond, étant donné que la chute des grains de 80 μ de la surface au plan de profondeur effective du densimètre se fait en 30 secondes environ, durée en-dessous de laquelle la turbulence due à l'agitation perturbe la sédimentation et fausse toute mesure.

Les courbes des graphiques XXII à XXVII ont été établies d'après les valeurs expérimentales qui sont consignées dans le tableau suivant (tableau LIII).

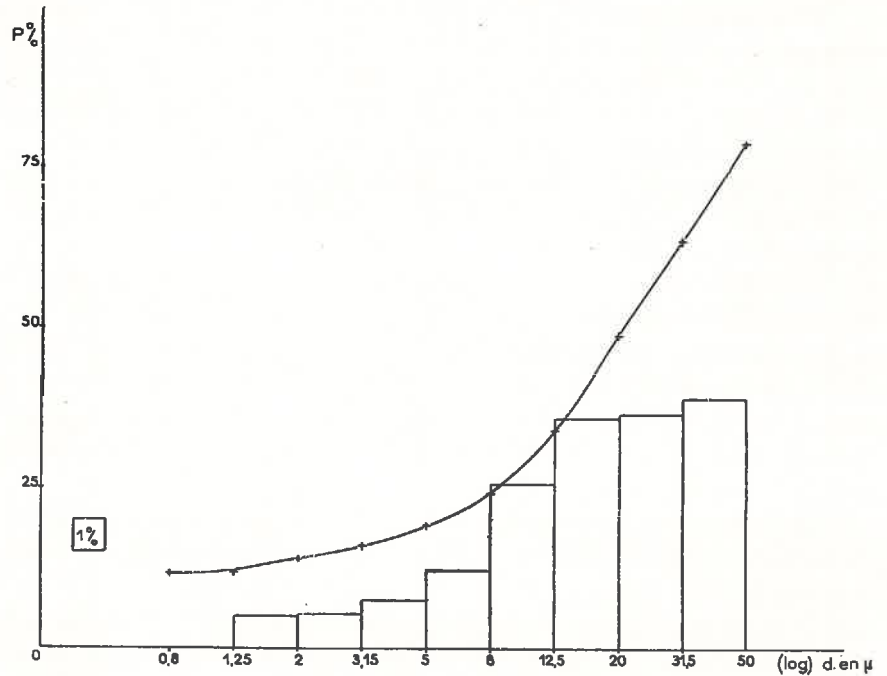
(Pour les sédiments calcaires, les pourcentages se rapportent à la totalité des éléments siliceux, à l'exclusion des éléments calcaires qui ont été détruits).

Les courbes tracées permettent par simple coup d'œil de se rendre compte de la composition granulométrique. Ainsi, *Nuits 25* montre une quantité importante de particules de dimension supérieure à 8μ , tandis que les fractions $8\mu-0,8\mu$ sont faiblement représentées, et que la somme d'éléments inférieurs à $0,8\mu$ est 11,8 %.

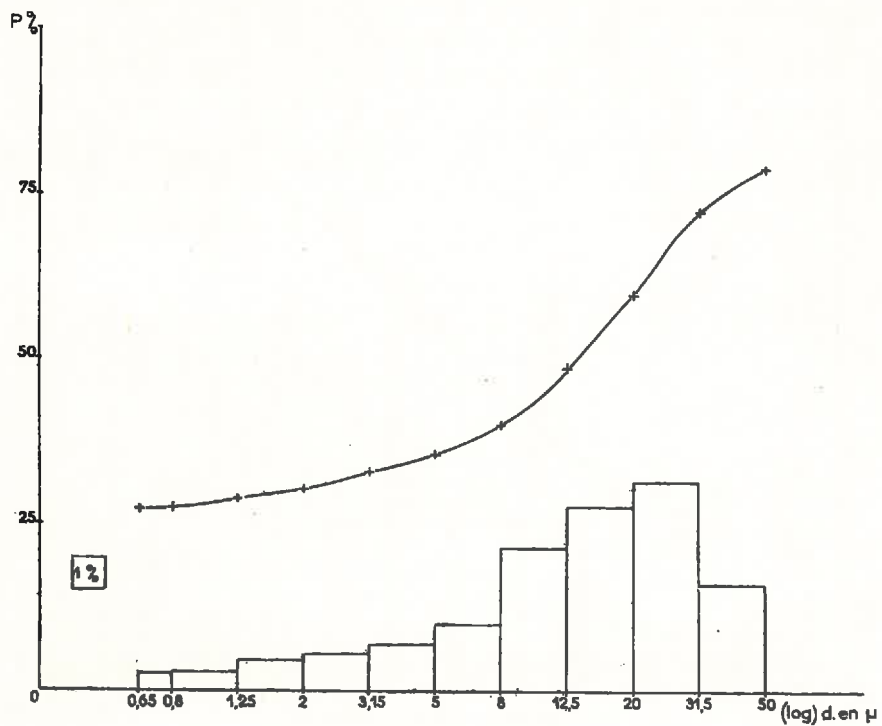
TABLEAU L,III

| Diamètre en μ | Pourcentage pondéral | | | | | | |
|-------------------|----------------------|---------|-----------|-----------|--------|---------------|------|
| | Nuits 25 | La Noue | St Marcel | Thézières | Millas | Blignys-Ouche | Lux |
| 50 | 78,9 | 78,7 | 81 | 81 | 30,9 | 53,1 | 82,7 |
| 31,5 | 63,4 | 72,3 | 80,6 | 79 | 21,1 | 49,7 | 75,5 |
| 20 | 48,7 | 59,7 | 78,6 | 75,6 | 13,5 | 42,9 | 71,5 |
| 12,5 | 34,3 | 48,5 | 74,6 | 68,8 | 9,6 | 34,5 | 68,6 |
| 8 | 24,1 | 39,9 | 70,6 | 59,8 | 6,5 | 28,9 | 66,2 |
| 5 | 19,3 | 35,9 | 64,5 | 49,5 | 3,6 | 24,2 | 64,2 |
| 3,15 | 16,3 | 33,1 | 56,8 | 40,5 | 2,1 | 19,7 | 63 |
| 2 | 14 | 30,8 | 50,1 | 31,7 | 1,2 | 15,2 | 61,8 |
| 1,25 | 11,8 | 28,9 | 43,5 | 28,3 | | 11,4 | 61 |
| 0,8 | 11,8 | 27,6 | 36,8 | 26,2 | | 8,4 | 59,4 |
| 0,65 | | 27,3 | | 25,3 | | | 58,6 |

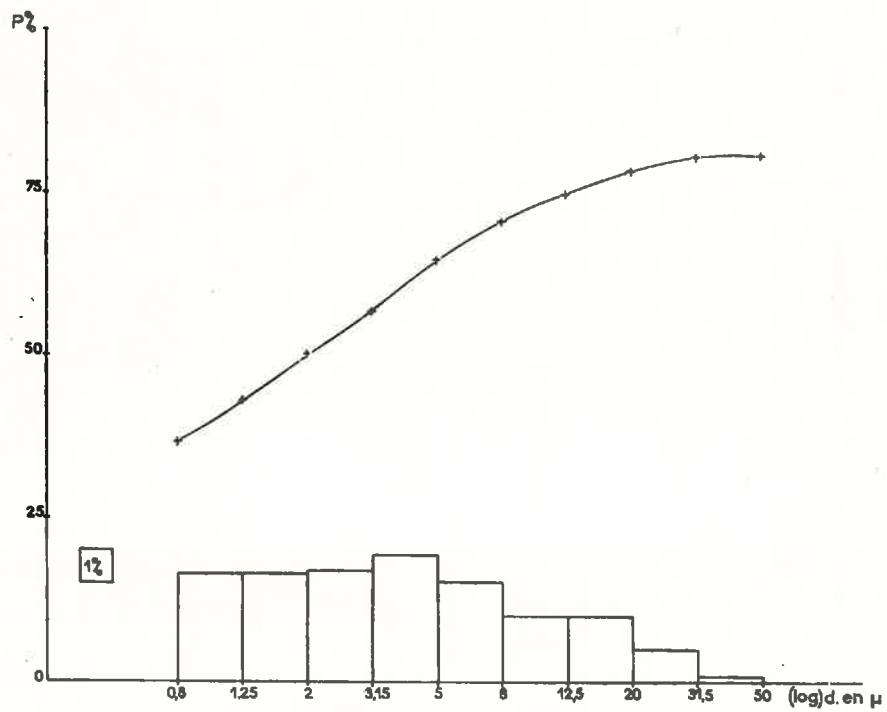
Pour *La Noue*, même prédominance des éléments $31,5 - 8\mu$, même valeur faiblement élevée des lots $8 - 0,65\mu$, tandis que la totalité des particules inférieures à $0,65\mu$ représente 27,3 %.



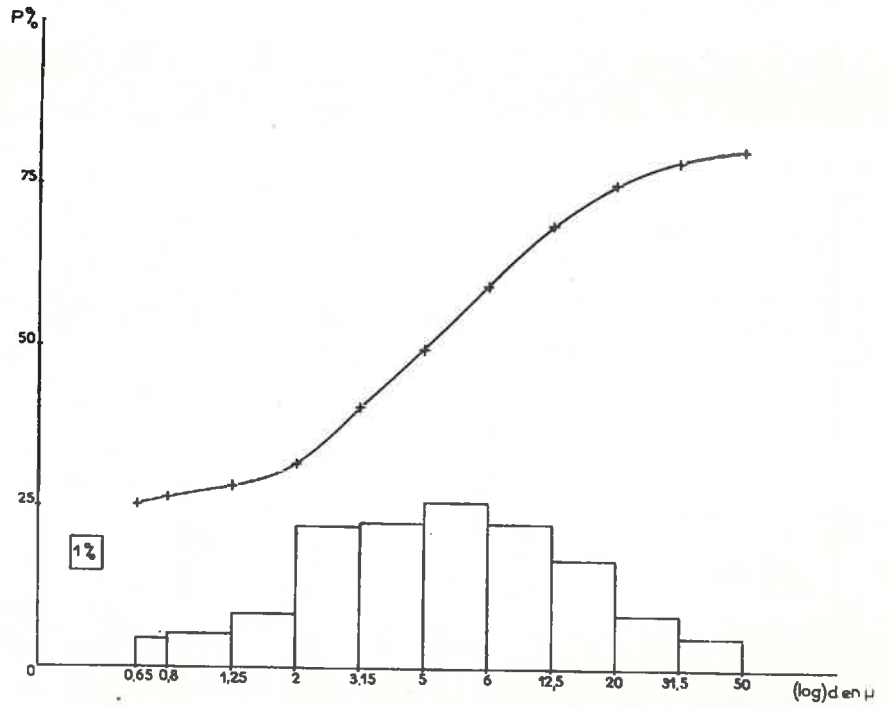
GRAPHIQUE XXII. — Nuits 25.



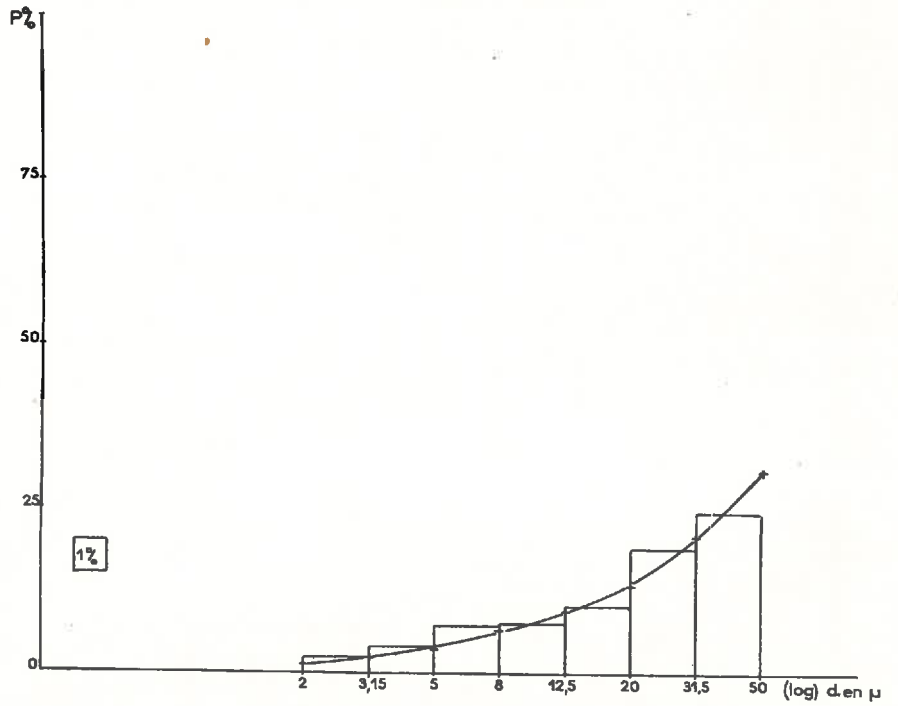
GRAPHIQUE XXIII. — La Noue.



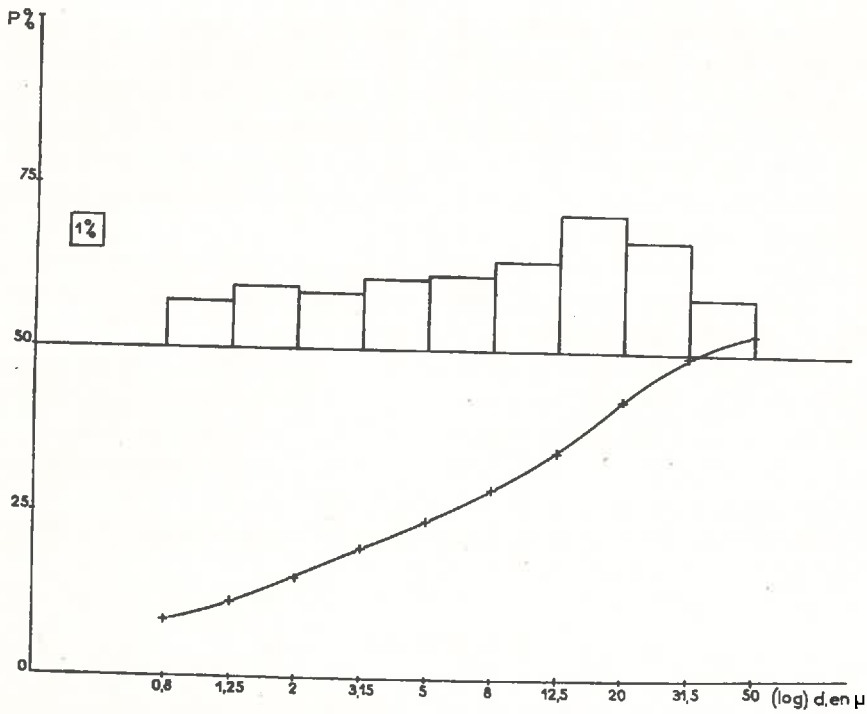
GRAPHIQUE XXIV. — Saint-Marcel-d'Ardèche.



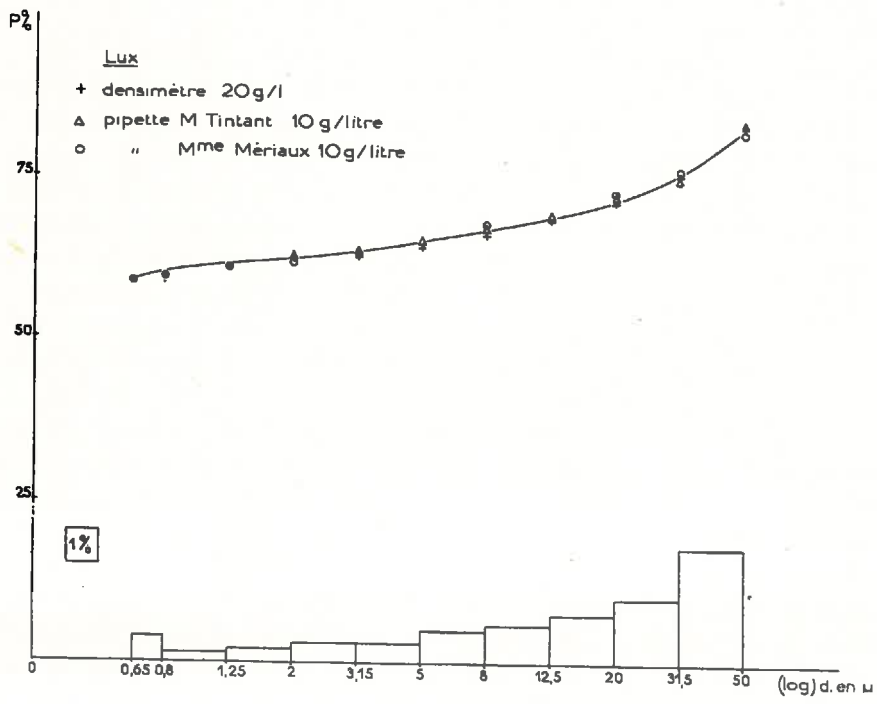
GRAPHIQUE XXV. — Thézières.



GRAPHIQUE XXVI. — Millas.



GRAPHIQUE XXVII. — Bligny-sur-Ouche.



GRAPHIQUE XXVIII.

Les deux marnes pliocènes de *Saint-Marcel-d'Ardèche* et *Thézières* montrent peu d'éléments supérieurs à $12,5\mu$ environ, mais la première contient une répartition quasi régulière des différentes fractions inférieures à cette dimension, l'ensemble des particules inférieures à $0,8\mu$ s'élevant à 29,5 %, tandis que la courbe de la deuxième marne témoigne d'un maximum pour les lots de $12,5\mu$ à 2μ , suivi d'une chute de 2 à $0,65\mu$. La fraction inférieure à $0,65$ représente 20,3 %.

Le sédiment de *Millas* ne correspond pas exactement aux possibilités du densimètre, parce que ses particules sont grossières pour la plupart. En effet, la majorité des éléments est supérieure à 20μ .

La marne domérienne de *Bligny-sur-Ouche* s'apparente au sédiment précédent, avec toutefois une gamme plus étendue vers les faibles dimensions. L'ensemble des grains inférieurs à $0,8\mu$ s'élève à 4,8 %.

Quant à l'argile de *Lux*, elle montre une décroissance régulière du pourcentage des fractions de plus en plus fines.

L'étude de ces sept matériaux différents montre l'intérêt de l'établissement rapide d'une courbe continue.

CONCLUSIONS

De l'ensemble de cette étude, il se dégage les conclusions suivantes concernant les deux méthodes simples d'analyse mécanique continue que nous nous sommes proposé d'étudier.

1) *Méthode par la mesure de la densité optique.* — Nous avons voulu, dans la deuxième partie de ce travail, rechercher, en vue de l'utilisation possible de la méthode, d'une part si les argiles et terres étudiées étaient soumises à la loi de BEER (relation simple entre la densité optique et la concentration), d'autre part si la densité optique variait avec la nature des argiles.

Or, l'étude expérimentale a montré que s'il existe bien une relation simple entre la densité optique et la concentration, par contre, la densité optique est variable avec la nature des constituants argileux et non argileux, ainsi qu'avec la composition granulométrique des suspensions envisagées. L'utilisation directe de la densité optique mesurée en lumière transmise, en vue de l'analyse granulométrique, est donc à éliminer. La méthode indirecte de P. DOPFER qui utilise la densité optique en lumière transmise et en lumière diffusée n'est pas non plus à retenir : elle permet dans 6 cas sur 10 d'atteindre une erreur inférieure à 10 %, à la condition d'avoir établi une courbe d'étalonnage à l'aide d'un grand nombre d'argiles de la région intéressée, car ainsi que le montre le graphique VIII, les argiles de sols ne se situent qu'au voisinage d'une courbe établie sur des argiles de sols, et non pas aux alentours d'une courbe établie sur des argiles minéralogiquement pures, ce qui traduit bien l'influence des constituants de la suspension sur la densité optique.

Ainsi, nous pouvons conclure à l'élimination des méthodes optiques comme méthodes simples d'analyse mécanique.

2) *Méthode densimétrique.* — Cette méthode est utilisée depuis longtemps par BOUYOUCOS qui emploie un appareil gradué de façon empirique et un procédé de dispersion qui semble insuffisant. A la suite d'une étude théorique (1^{re} partie) sur la forme du densimètre et l'interprétation la plus adéquate, nous avons précisé expérimentalement les meilleures conditions d'emploi de cette méthode :

a) la prise d'essai a été choisie égale à 30 g pour le densimètre (quantité qui peut être réduite à 20 g dans le cas des matériaux très argileux) ;

b) l'agent dispersant se révèle être indifféremment le pyrophosphate de sodium ou le citrate de sodium en solution normale, à la dose de 30 cc par litre (quantité qui peut être ramenée à 10 cc par litre, dans le cas de terres peu argileuses ;

c) la position du densimètre en profondeur donne la meilleure précision, ce qui conduit à condamner pratiquement l'emploi de l'uréomètre ;

d) α) l'immersion permanente est préférable, pour la précision des résultats, à l'immersion temporaire ;

β) l'interprétation la plus précise est celle qui traduit la densité lue comme la densité réelle au plan h_R dont la profondeur est définie par l'équation 27, page 25.

γ) les interprétations h_R faites respectivement avec le cylindro-bicône réel et avec le cylindre équivalent qui répond aux conditions de la page 37 sont identiques, ce qui permet une simplification des calculs.

La précision de la méthode a été déterminée d'une part par un calcul théorique, d'autre part par une étude sur un nombre assez grand de déterminations sur le même échantillon, pour les particules allant de 20μ à $0,8\mu$. Il en découle que cette précision semble suffisante et de l'ordre de celle de la méthode de la pipette.

En résumé, la méthode densimétrique nous semble, par son degré de précision, sa simplicité et son prix de revient modique, applicable à l'analyse granulométrique en série. Elle présente sur la méthode de la pipette l'avantage d'éviter les manipulations et les pesées, donc elle permet une économie de temps, et, de plus, elle permet d'obtenir, très simplement, une courbe continue dont le seul aspect renseigne sur la composition granulométrique du sédiment étudié.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) GESSNER (H.). — L'analyse mécanique, tamisage, sédimentation, lévigation (Dunod), 270 p.
- (2) CASAGRANDE. — Die Aräometer methode zur Bestimmung der Korn Verteilung von Böden und anderen materialien. Julius Springer, Berlin, 1934.
- (3) PURI (A. N.) and PURI (B. R.). — Physical characteristics of soils : IV. Density gradients in a sedimenting column and a chaino-hydrometer for mechanical analysis of soils. *S. Sc.*, 1939, 48, p. 149.

- (4) DAY (P. R.). — Physical basis of particle size analysis by the hydrometer method. *S. Sc.*, 1950, vol. 70, n° 5, p. 353.
- (5) BOUTARIC (A.). — *Le Radium*, t. XI, mars 1914 et *Ann. de Physique*, 9^e série, t. IX, 1918, p. 195.
- (6) FRANC DE FERRIÈRE (P. J. J.). — Microstructure cristalline des argiles et problèmes potassiques (*Sté des Potasses d'Alsace*), p. 26.
- (7) MÉRIAUX (S.). — Étude de la viscosité des suspensions d'argile (*Ann. Agr.*, n° 3, 1952).
- (8) DOPTER (P.). — Essai de dosage d'argile par photométrie. *Ann. Agr.*, 1938, p. 769-776.
- (9) BOUYOUCOS (G. J.). — The hydrometer as a new and rapid method for determining the colloidal content of soils. *S. Sc.*, 1927, XXIII, p. 319.
- (10) BOUYOUCOS (G. J.). — The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. *S. Sc.*, 1927, XXIII, p. 343.
- (11) BOUYOUCOS (G. J.). — The hydrometer method for studying soils. *S. Sc.*, 1928, XXV, p. 365.
- (12) BOUYOUCOS (G. J.). — Making mechanical analysis of soils in fifteen minutes. *S. Sc.*, 1928, XXV, p. 473.
- (13) BOUYOUCOS (G. J.). — The hydrometer method for making a very detailed mechanical analysis of soils. *S. Sc.*, 1928, XXVI, p. 233.
- (14) BOUYOUCOS (G. J.). — Studies on the dispersion procedure used in the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *S. Sc.*, 1932, XXXIII, p. 21.
- (15) BOUYOUCOS (G. J.). — A comparison between the pipette method and the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *S. Sc.*, 1934, XXXVIII, p. 335.
- (16) BOUYOUCOS (G. J.). — A comparison of the hydrometer method and the pipette method for roeckly mechanical analysis of soils, with new directions. *J. Amer. Soc. Agron.*, 1930, XXII, 743.
- (17) BOUYOUCOS (G. J.). — A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *Agronomy Journal*, 1951, 43, p. 434.
- (18) PRATOLONGO (V.). — Stazioni Sperimentale agrarie. *Ital.*, 50-117, 1917.
- (19) GESSNER (H.). — L'analyse mécanique (Dunod), p. 128-129.
- (20) JOSEPH (A. F.). — The determination of soil colloids. *S. Sc.*, 1927, XXIV, 271-274.
- (21) KEEN (B. A.). — Soil mechanics and physics. *S. Sc.*, 1928, XXVII, p. 20.
- (22) BLACK (I. A.). — Theoretical errors of hydrometer method for the mechanical analysis of soils. *The Journal of Soil Science* (1951), vol. 2, n° 1.
- (23) PURI (A. N.). — A new type of hydrometer for the mechanical analysis of soils. *S. Sc.*, 1952, XXXIII, p. 241.
- (24) KEEN (B. A.). — Some comments on the hydrometer method for studying soils. *S. Sc.*, 1928, XXVI, p. 261.
- (25) MÉRIAUX (S.). — Observations sur la méthode densimétrique dans l'analyse granulométrique. *C. R. Acad. Sciences*, 235, p. 381-383, 4 août 1952.
- (26) VIGH DJORDJE. — Primena Areometarske metode Casagrandeaza odredivanje mehanickog sastava zemljista Vojvodine. Archives Scientifiques de la Matica srpska. Série des Sciences naturelles, t. I, 1951.

(Seules sont notées les références des travaux dont il est fait directement état dans le texte).

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :

IDENTIFICATION DES MINÉRAUX PAR LA MÉTHODE DEBYE-SCHERRER. POSSIBILITÉS. LIMITES

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 10 Avril 1953.

*Le Doyen de la Faculté des Sciences,
Pour le Doyen, l'Assesseur,*

ROBERT LEVY.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

*Le Vice-Président du Conseil
de l'Université de Paris,*

A. CHATELET.