

# **PROCÈS-VERBAL**

**de la cent treizième séance tenue le 26 mai 1943  
à l'Hôtel Ravenstein, 3 rue Ravenstein, à Bruxelles**

---

---

## **SOMMAIRE :**

**Communications de M. CAMPUS, Professeur et Directeur du Laboratoire de l'Institut du Génie Civil à l'Université de Liège et de MM. P. GRIGNET et R. JACQUEMIN, Assistants :**

## **CLASSIFICATION DES SOLS**

- a) Détermination des argiles (M. Campus).**
  - b) Granulométrie par lévigation - Précision de la méthode (M. Grignet).**
  - c) Détermination chimique de la fraction argile - Précision de la méthode (M. Jacquemin).**
- 
-

# PROCÈS-VERBAL

de la cent treizième séance de l'Association Belge pour l'Etude,  
l'Essai et l'Emploi des Matériaux  
tenue le 26 mai 1943 à l'Hôtel Ravenstein, 3, rue Ravenstein, à Bruxelles.

---

La séance est ouverte à 15 heures.

*Présidence* : H. RABOZÉE.

## ORDRE DU JOUR :

Communication de :

M. CAMPUS, Professeur et Directeur du Laboratoire de l'Institut du Génie Civil à l'Université de Liège, et de MM. P. GRIGNET et R. JACQUEMIN, Assistants, sur :

### Classification des sols (2<sup>e</sup> communication) (1)

- a) Détermination des argiles (M. Campus).
- b) Granulométrie par lévigation. — Précision de la méthode (M. Grignet).
- c) Détermination chimique de la fraction argile. — Précision de la méthode (M. Jacquemin).

*Membres présents* : MM. Biquet, Brédael, Blondiau, Cabu, Campus, Corin, Cox, Campu R., D'Armentières, de Magnée, de Grand Ry, Delvaux, D'Hooghe, Daubresse, Dutron, Dulcino, Debaize, D'Herme, François, Grignet, Hermidas, Herman, Herbaut, Henry, Jacquemin, Fobelets, Laureys, Lefebvre, Morelle, Matthis, Rabozée, Sereckx, Schepens, Slickx, Speltens, Sariban, Pirlot, Thilly, Verdeyen, Van der Linden, Wurth.

*Membres excusés* : MM. Bockholtz, Bodson, Bollengier, Chauffoureaux, Homes, Reichert.

---

(1) Le texte de la première communication « Classification et dénomination des sols » présentée par M. Campus le 15 mars 1941 fait l'objet de notre bulletin n° 2, 1941.

# DÉTERMINATION DES ARGILES

par F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège.

---

**Résumé.** — *Une étude antérieure sur la classification et la dénomination des sols a montré le caractère peu satisfaisant de la notion d'argile dans une classification granulométrique. Approfondissant ce sujet, l'auteur montre que l'argile ne peut recevoir de définition correcte que du point de vue minéralogique, non granulométrique. Il est nécessaire de compléter la définition granulométrique d'un sol argileux par la détermination minéralogique des composants argileux effectuée par voie chimique.*

Dans une publication précédente, nous avons défendu les principes d'une classification et d'une dénomination des sols basées sur l'analyse granulométrique. Nous y avons insisté déjà sur les difficultés que la méthode provoque au sujet de la fraction argileuse des sols, tant en ce qui concerne la dénomination que la détermination vraie. La continuation de l'étude de cette question que nous annonçons dans ce travail, fait l'objet de la présente publication, complétée par les annexes de nos assistants MM. Grignet et Jacquemin.

En commençant, nous désirons revenir brièvement sur certains points de la publication précédente, non sans utilité pour le sujet plus spécial de l'actuelle. Nous avons proposé, en premier lieu, une échelle de classification granulométrique qui est celle d'Atterberg, de P. Niggli et de l'Association internationale pour la Science des Sols (1930), à

savoir 2  $\mu$  — 20  $\mu$  — 200  $\mu$  — 2 mm — 20 mm — 200 mm. Toute classification étant relative et conventionnelle, nous avons en second lieu proposé l'échelle 5  $\mu$  — 50  $\mu$  — 500  $\mu$  — 5 mm — 50 mm — 500 mm. Revoyons les raisons invoquées en faveur de cette alternative. La première, que la limite supérieure de 5  $\mu$  est plus appropriée ou plus opportune pour l'argile, paraîtra dépourvue de signification à la suite de la présente communication. La seconde visait une meilleure concordance des dénominations des fractions avec le langage usuel. Nous songeons principalement à la limite séparative des sables et des graviers (5 mm au lieu de 2) et à celle des graviers et des galets (50 mm au lieu de 20). Cet argument ne peut être considéré comme négligeable en géotechnique, science d'application, puisque aussi bien les minéralogistes l'admettent (cfr. P. Urbain. Introduction à l'étude pétrogra-

phique et géochimique des roches argileuses, 1937, fasc. I, pp. 3 et 30).

La X<sup>e</sup> Commission de l'A. B. E. M. a opté pour l'échelle d'Atterberg et de P. Niggli. Une classification granulométrique est ainsi définie. Elle répond aux conditions d'une classification appropriée et suffisante pour les catégories dénommées blocs, galets, graviers, sables grossiers et fins et limons, formant des amas *pulvérulents* dont les caractères physiques et mécaniques principaux sont :

- la dispersion macroscopique,
- la porosité,
- le frottement,
- l'absence de cohésion vraie.

La cohésion apparente peut se manifester dans les catégories les plus fines par suite d'une humidité modérée, mais non à l'état sec ou gorgé d'eau. Au point de vue géotechnique, les caractères ci-dessus sont clairement exprimés par les dénominations correspondant à la classification et ne requièrent en général pas de compléments, basés par exemple sur la nature chimique ou minéralogique. Ces compléments ont plutôt l'aspect de détails analogues à ceux des caractéristiques géotechniques définis par les essais pour un échantillon quelconque de sol et qui ne sont, sauf cas particulier, pas nécessaires pour la dénomination géotechnique. Une réserve peut être faite du point de vue granulométrique au sujet de la forme au moins générale des grains (roulés, anguleux, déchiquetés), qu'il est souvent désirable de connaître et qui influence les propriétés générales précitées. Ce complément peut d'ailleurs le plus souvent être déterminé *grosso modo* par des observations simples oculaires ou tactiles, éventuellement avec le secours de la loupe ou du microscope pour les grains les plus fins des sables et des limons.

Le fondement de la classification et de la dénomination unifiées sur l'analyse granulométrique rend nécessaire la normalisation précise des méthodes. La question concerne certes le tamisage, mais surtout la sédimentation. A titre d'introduction, M. Grignet expose dans l'annexe I, la mise au point des méthodes employées au Laboratoire d'essais des constructions du Génie civil de l'Université de Liège, avec des indications critiques sur quelques questions telles que la pratique du tamisage, le raccord des opérations de tamisage et de sédimentation, la précision et la reproductibilité des résultats, l'échantillonnage et la variabilité des résultats d'un échantillon à l'autre. Signalons la question assez incertaine des dimensions caractéristiques réelles des refus ou produits des divers tamis et aussi des prises de sédimentation. Andreasen (The fineness of solids and the technological importance of fineness, Copenhague, 1939) utilise à cet effet des déterminations assez compliquées par numération microscopique au moyen de cellules compteuses, pour déterminer les dimensions

moyennes des grains des fractions obtenues tant par tamisage que par sédimentation. Partisan de méthodes simples, eu égard au caractère conventionnel de l'analyse granulométrique et à son application toujours assez laborieuse, nous estimons cependant qu'elles doivent être examinées à l'origine dans un esprit assez critique et en rapport aussi étroit que possible avec les bases scientifiques de la question.

L'étude de la précision de la méthode de sédimentation par l'examen de la reproductibilité des résultats, qu'exposera M. Grignet, montre l'incertitude considérable dont est grevée l'analyse granulométrique des terres fines, en raison de l'opération difficile de la défloculation. Si elle affecte surtout les fractions argileuses ( $< 2\mu$ ), elle se répercute aussi sur les fractions limoneuses (2-20  $\mu$ ). Les résultats obtenus dans notre laboratoire concordent avec ceux que relatent des publications américaines. Mais ils ne résolvent pas le problème de la meilleure défloculation pour chaque sol, dont nous comptons poursuivre l'étude au moyen du pH. Si ces efforts pouvaient aboutir, un perfectionnement important serait réalisé, à défaut de quoi l'analyse granulométrique des fractions les plus fines est actuellement entachée d'une incertitude qui enlève notamment une grande partie de leur pertinence aux spéculations relatives aux limites granulométriques des fractions dénommées argileuses.

La difficulté déjà exposée dans notre publication précédente concernant l'emploi de la dénomination argile pour la fraction la plus fine de l'analyse granulométrique ne gît réellement pas dans l'imperfection de l'analyse pour ces fractions, elle est plus essentielle. La notion exprimée par le mot argile ne correspond pas à un caractère purement granulométrique, de nature géométrique, comme pour les mots gravier, sable, voire limon, mais bien à un caractère minéralogique, c'est-à-dire structural, de nature physico-chimique ou chimique. Considéré sous cet angle, le terme argile soulève encore une autre difficulté, qui affecte même le minéralogiste. M. P. Urbain (*op. cit.*) l'exprime comme suit : « La tutelle de la langue vulgaire, qui pèse lourdement sur le langage scientifique, est la cause d'un paradoxe dont la pétrographie des roches sédimentaires n'offre plus d'autres exemples depuis que M. L. Cayeux a pris soin de distinguer la dolomite des dolomies et la sidérite des sidéroses : on nomme argiles des minéraux et des roches à la fois, comme à l'époque où les classifications ne séparaient pas les premiers des secondes, ou à celle, à peine plus éloignée, où une argile n'était qu'une matière première, « une terre molle et grasse », utilisée par le potier, le briquetier et le foulon. » Le vocable argile désigne pour le minéralogiste, le pétrographe et le géologue une variété de roches d'ailleurs très complexes, possédant certains caractères spécifiques. Le géotechnicien ne peut, au risque de créer une confusion, donner une autre signification à cette dénomination.

La définition géotechnique de l'argile doit être la même que sa définition pétrographique ou minéralogique. Le caractère granulométrique n'y joue aucun rôle décisif, encore que les minéraux proprement argileux soient présents dans les argiles sous forme d'une dispersion dont l'ordre de grandeur des éléments est de quelques  $\mu$ , qui peut cependant empiéter largement sur le domaine  $2 \mu - 20 \mu$  assigné aux limons par la classification arrêtée par la 10<sup>e</sup> Commission. D'autre part, M. Grignet a analysé au laboratoire un sol (essai n<sup>o</sup> 13.429) contenant environ 81% de grains de moins de  $2 \mu$  et 78% de grains de moins de  $1 \mu$ , dont 47% seulement, d'après la méthode chimique, consistent en minéraux argileux. Le reste, soit environ 34% de grains de moins de  $2 \mu$ , se compose vraisemblablement en majeure partie de silice sableuse très fine, qui serait de la cristobalite d'après P. Niggli, ainsi que de mica, d'oxyde de fer et, éventuellement, d'un peu de carbonates. L'échantillon en question est celui dont M. Grignet s'est servi pour les essais comparatifs de défloculation et les pourcentages granulométriques cités sont les plus grands obtenus, c'est-à-dire correspondent à la meilleure défloculation. Il faut bien noter qu'en plus des incertitudes provenant de la défloculation, les dimensions granulométriques des minéraux argileux déterminées par sédimentation sont incertaines en raison de la densité variable d'une espèce à l'autre et de la forme lamellaire, non sphérique, ce qui perturbe l'application de la formule de Stokes. En conséquence :

1<sup>o</sup> Il n'est pas convenable de dénommer argile une fraction granulométrique même inférieure à  $2 \mu$ . A l'instar de P. Niggli, il convient plutôt de choisir une dénomination caractérisant le degré de dispersion, telle que impalpable ou suspension. La précision des dimensions est incertaine. Le terme colloïde doit conserver sa signification physico-chimique.

2<sup>o</sup> La dénomination argile désignant une variété de roches complexes dont la composition peut varier dans des limites très étendues, elle doit nécessairement correspondre, en rapport avec la granulométrie, à des compositions dont la représentation la plus usuelle en géotechnique est le diagramme triangulaire; par exemple celui de la figure 7 de notre communication précédente.

3<sup>o</sup> Pour certains ouvrages et certains usages relevant de la géotechnique, les cahiers des charges prescrivent l'emploi de terres contenant une certaine proportion d'argile. A défaut de spécification précise de l'argile, une telle prescription est dénuée de toute signification et garantie. Il existe des cas, non dépourvus d'importance, dans lesquels, pour la raison qui vient d'être indiquée, l'effet que les prescriptions voulaient et devaient assurer n'a pas été réalisé. Il est donc indispensable et important, pour de telles applications, de substituer des spécifications réelles et mesurables à des notions non

définies et incontrôlables ou dont le contrôle est fallacieux.

Il faut donc préciser :

1<sup>o</sup> que l'élément caractéristique des argiles est formé par les constituants ou minéraux argileux ;

2<sup>o</sup> quelle est la proportion minimum de ces constituants qui classe une roche dans la variété des argiles ;

3<sup>o</sup> une méthode pratique, caractéristique et suffisamment exacte, du point de vue géotechnique, permettant de déterminer cette proportion.

Tous ces points inspiraient déjà les remarques finales de notre publication précédente et orientaient déjà nos investigations dès le commencement de 1941. Elles étaient toutefois à leur début. Depuis, nos collaborateurs MM. Grignet et Jacquemin, avec le concours de M. Plateus, chimiste, ont poursuivi ces recherches, les ont approfondies et menées, pensons-nous, à un aboutissement satisfaisant. Ces investigations ont, plus récemment, débordé du domaine de la géotechnique, par une collaboration spéciale aux recherches sur les terres plastiques effectuées par M. Calembert, associé du F. N. R. S., sous la direction de M. P. Fourmarier, professeur à l'Université de Liège. Nous admettons, à la suite d'une correspondance avec M. Calembert, la définition suivante des minéraux argileux : « associations de silicates hydratés aluminiques, aluminomagnésiens ou ferriques, doués de propriétés comparables à celles des colloïdes, et d'une solution d'électrolytes dont la minéralisation est fournie, partiellement ou complètement, par des matériaux non caractéristiques, solubles ou altérables. Le diamètre moyen des particules des silicates caractéristiques est voisin du micron, la limite supérieure étant de l'ordre de 50 à 100  $\mu$ . » La limite supérieure de dimensions serait, d'après cela, supérieure à celle de  $20 \mu$  indiquée sur le diagramme du professeur Niggli (tableau II de la communication précédente du 18 mars 1941). Nos déterminations maintenant assez nombreuses confirment jusqu'à présent, au point de vue géotechnique, la limite du professeur Niggli, en ce sens que, sous les réserves faites au sujet de l'analyse granulométrique, nous n'avons pas trouvé par la voie chimique un pourcentage de constituants argileux dépassant celui de la fraction des grains  $< 20 \mu$ , ces deux pourcentages étant cependant très voisins dans certains échantillons. Nous avons indiqué plus haut que nous avons trouvé, dans un échantillon, un pourcentage important de constituants non argileux de grains  $< 2 \mu$ , ce qui corrobore le tableau du professeur Niggli (cristobalite, carbonates, minerais et micas, constituants sableux). Il faut noter que le diamètre déterminé par sédimentation pour les grains argileux doit être par défaut, en raison de leur forme et éventuellement de leur densité. M. P. Urbain, pétrographe (*op. cit.*) fait allusion à des minéraux argileux éventuellement assez gros, mais très rares,

Nos tentatives de procéder par une voie autre que la granulométrie à la détermination des fractions réellement argileuses nous ont fait refaire, sans utilité, les expériences de chercheurs anciens, dont les travaux très spéciaux, nous étaient alors inconnus. Ces questions intéressent de nombreux domaines, non seulement des sciences minéralogiques, pétrographiques et géologiques, mais aussi des sciences appliquées, telles que l'agronomie, la pédologie, la céramique. Ainsi que le remarque M. P. Urbain, la synthèse des conceptions de l'argile dans ces diverses branches reste à faire. La conception de certains, telle l'analyse globale utilisée par les céramistes, ne peut convenir pour la géotechnique, nouvelle venue parmi les sciences d'application.

D'après M. P. Urbain, A. de Fourcroy définissait en 1789 : « qu'on ne doit donner le nom d'argile qu'aux terres qui durcissent au feu, peuvent se délayer dans l'eau et former de l'alun avec l'acide sulfurique ». La première propriété intéresse le céramiste et ne peut être utile pour le but que nous poursuivons. Il en est de même de la deuxième ou plus généralement de la plasticité. Au point de vue géotechnique, cette propriété en rapport avec les relations complexes des minéraux argileux et de l'eau ne permet pas leur analyse ; elle ne les distingue pas nettement des autres constituants de finesse analogue. Nous avons communiqué à la X<sup>e</sup> Commission une liste d'indices de plasticité selon Atterberg dont on ne peut déduire aucune relation avec la proportion d'argile vraie déterminée chimiquement, ni même avec le détail de la granulométrie (voir tableau). De même, les propriétés principales que les éléments argileux confèrent aux sols qui en contiennent, la cohésion et l'imperméabilité, ne permettent pas une séparation et une mesure de la proportion de ces éléments. Nous avons été ainsi conduits, sans connaître alors la définition de Fourcroy, à son dernier terme, l'action de l'acide sulfurique qui, par mises au point successives, nous a conduit à une forme de ce que l'on appelle l'analyse rationnelle. Nous avons éprouvé de l'encouragement et de la satisfaction en trouvant après coup, dans l'ouvrage précité de M. P. Urbain, pétrographe averti, que nous avons suivi une voie classique, mais encore assez peu usuelle et qui a fait seulement assez récemment l'objet de travaux très spéciaux et certes peu connus en géotechnique (L. Thiébaud, Contribution à l'étude des sédiments argilo-calcaires du Bassin de Paris. Thèse 1925).

M. Jacquemin expose avec exactitude, dans l'annexe II, le détail de la méthode qu'il a mise au point avec M. Plateus, en examinant d'une manière critique sa signification, sa précision, la reproductibilité des résultats pour un même échantillon et leur variabilité d'un échantillon à l'autre d'un même sol, en rapport avec la question importante de l'échantillonnage en géotechnique.

M. P. Urbain procède à une critique assez serrée de l'analyse rationnelle complète, qui intéresse le

minéralogiste. Son objection principale concerne la détermination de la silice. Elle ne s'applique pas à la méthode que nous proposons, qui ne concerne que les constituants argileux et abandonne la silice dans le résidu, dont l'analyse sort du but poursuivi. En ce qui concerne les erreurs qui peuvent provenir de l'action sélective des acides, qui repose uniquement sur la différence de vitesse des réactions, elles sont insignifiantes pour le but poursuivi, ainsi que l'indique M. Jacquemin. La méthode très définie qu'il expose diffère d'ailleurs dans le détail de celle de M. Thiébaud et semble mise au point d'une manière très adéquate. La critique concernant la séparation individuelle des minéraux argileux n'affecte pas du tout la méthode, attendu que nous ne recherchons pas cette séparation mais seulement la somme des éléments argileux caractéristiques. Cette détermination suffit actuellement pour la géotechnique. Les méthodes physiques microscopiques, thermiques et radiographiques peuvent être certes plus parfaites pour le minéralogiste et le pétrographe, qui poursuivent le but de séparer et caractériser les espèces minéralogiques argileuses multiples et complexes, présentes dans les roches. Actuellement, ce but et les moyens de l'atteindre dépassent les besoins de la géotechnique. Nous pensons qu'en complétant la classification granulométrique poussée jusqu'à l'impalpable ( $< 2 \mu$ ) par l'indication totale de la proportion pondérale de minéraux caractéristiques argileux, déterminée par la méthode chimique indiquée, nous aurons établi les bases d'une classification suffisante pour les besoins généraux actuels de la géotechnique, accompagnée d'une terminologie qui ne prête à aucune confusion, qui est en accord avec les données scientifiques et ne s'écarte cependant pas du langage courant, mais le précise (1).

C'est en restant dans ce cadre défini de la géotechnique que nous avons cherché avec nos collaborateurs à apporter une contribution qui définisse nettement le problème considéré et offre, pour sa solution, une méthode pratique et satisfaisante, présentée sous une forme propre à une normalisation. Il reste à fixer éventuellement des normes, c'est-à-dire des chiffres, qui peuvent requérir encore des discussions, surtout avec les praticiens, portant sur les propriétés de cohésion et d'imperméabilité des terres argileuses dont ils veulent tirer parti dans leurs constructions. La méthode peut présenter d'ailleurs de l'intérêt pour d'autres champs d'application ; notre laboratoire l'a appliquée avec succès pour la sélection de terres à briques.

(1) En ce qui concerne les dénominations, on pourrait appliquer à la fraction granulométrique ( $2 - 20 \mu$ ) celle de *limon grossier* au lieu de *limon* et dénommer *limon fin* la fraction  $< 2 \mu$ . A ces dénominations *granulométriques* satisfaisantes s'ajouterait la dénomination *minéralogique d'argile*, correspondant à la détermination par l'analyse chimique rationnelle.

TABLEAU

Indices de plasticité (selon Atterberg) de certains sols en rapport avec le pourcentage de particules très fines et la proportion de silicates hydratés d'alumine déterminée par voie chimique.

Echantillon	5647-1D	11212	5647-2D	11278	11187	11349-B		11186	111349-V	
	Hollogne			Andenne	Ninane			Ninane		
L. L. %	20,8	63,0	29,4	90,5	32,4	52,8	49,7	55,8	44,1	44,9
L. P. %	—	17,5	24,1	26,2	14,3	25,8	25,3	22,4	22,7	23,4
I. P. %	—	45,5	5,3	64,3	18,1	27,0	24,4	33,4	21,4	21,5
< 5 $\mu$ %	9,0	56,0	8,0	74,0	47,0	74,0		37,5	68,5	
Silic. hydr. alum. (voie chimique)		38,62		81,77	41,65	61,19		30,15	77,86	

  

Echantillon	8337-A	8337-B	6985-1	6985-2	6985-3	6985-4	6985-5	6119
	Calcutta		Calcutta C. S.					Schelle
L. L. %	64,0	54,2	61,4	82,8	59,5	48,6	35,5	133,0
L. P. %	20,4	22,0	30,5	25,0	14,8	19,5	22,0	43,0
I. P. %	43,6	32,2	30,9	57,8	44,7	29,1	11,5	90,0
< 5 $\mu$ %	40,0	56,5	70,0	44,0	34,5	45,5	31,0	
							[<20 $\mu$ :31,5]	

  

Echantillon	5647-1M	5647-2M	5647-3M	5647-4M	5647-5M	5647-3D	11011	13024
	Mons-lez-Liège							
L. L. %	22,9	32,2	23,7	28,0	26,3	28,8	65,2	22,3
L. P. %	20,5	17,2	27,3	27,6	23,5	20,0	20,4	—
I. P. %	8,4	15,0	—	0,4	2,8	8,8	44,8	—
< 5 $\mu$ %	8,0	10,0	28,5	19,0	3,0	8,0	59,5	11,0
Silic. hydr. alum. (voie chimique)							68,00	20,66

  

Echantillon	8243-A	8243-B	8308-A	8308-B	9981-10	13114-I	13114-II	13114-II.
	Calcutta C. H.		Calcutta N. C. H.		Limon Hasselt	Boom		
L. L. %	32,5	27,5	24,6	36,5	67,0	63,8	79,0	75,4
L. P. %	26,9	21,0	23,9	22,6	34,4	21,6	26,4	26,25
I. P. %	5,6	6,5	0,7	13,9	34,6	42,2	52,6	49,15
< 5 $\mu$ %	19,0	13,5	12,0	16,0	32,5	57,0	57,0	75,0
Silic. hydr. alum. (voie chimique)						30,3	34,1	36,67

## ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES SOLS PAR SÉDIMENTATION (PRÉCISION DE LA MÉTHODE)

par P. GRIGNET

Assistant à l'Université de Liège.

**Résumé.** — L'auteur expose la méthode préconisée par l'A. S. T. M. <sup>(1)</sup> (Association américaine pour l'essai des matériaux) en vue de l'analyse granulométrique des sols. Il passe en revue les imperfections

que présente cette méthode et les modifications à apporter pour les réduire. Il fait part des différents essais qui l'ont amené à ces modifications et, enfin, il étudie brièvement la précision de la méthode améliorée.

<sup>(1)</sup> Tentative method of mechanical analysis of soils. D. 422-38 T.-A. S. T. M. Proceedings, vol. 38, part I, 1938, p. 953-964. Il s'agit d'une Tentative Standard introduit en 1935, revu en 1938 et susceptible de révision annuelle.

Le principe de la méthode est le suivant : moyennant certaines précautions, on met un échantillon de la terre à analyser en suspension dans de l'eau.

distillée. Les grains constituant l'échantillon se déposent lentement, les plus gros les premiers ; la densité de la suspension diminue progressivement et on la mesure, après des temps donnés, au moyen d'un aréomètre. On calcule d'autre part, au moyen de la formule de Stokes, le diamètre maximum des grains encore en suspension après les mêmes temps.

L'échantillon destiné à l'analyse granulométrique, préalablement séché à l'air et broyé dans un mortier avec un pilon de caoutchouc, pour détruire les grumeaux, est prélevé par la méthode du partage en quatre sur les matières traversant le tamis à mailles carrées de 2 mm. La quantité prélevée est d'environ 115 gr pour les terres sableuses et 65 gr pour les terres argileuses ; 15 gr servent à déterminer la teneur en eau de l'échantillon et le reste, soit 100 gr ou 50 gr selon le cas, est pesé avec précision et dispersé par une des méthodes ci-après. La méthode à employer dépend de l'indice de plasticité de l'échantillon.

Si cet indice est plus petit que 20, la terre est placée dans un béc hier de forme haute et on ajoute lentement 200 cm<sup>3</sup> ou plus d'eau distillée en agitant continuellement jusqu'à ce que la terre soit parfaitement humectée. Ce mélange est laissé au repos pendant au moins 18 heures. Après ce délai, on ajoute de l'eau distillée jusqu'à obtenir un volume d'environ 500 cm<sup>3</sup> et ensuite 20 cm<sup>3</sup> d'une solution de silicate de soude cristallisé, qui agit comme défloculant. La concentration de cette solution est telle que sa densité égale 1,023 à la température de 19,4° C. La suspension est ensuite mélangée pendant une minute à l'aide d'un agitateur mécanique spécial standardisé.

Lorsque l'indice de plasticité de l'échantillon est supérieur à 20, la terre est placée dans un béc hier de forme haute et on ajoute lentement 100 cm<sup>3</sup> d'eau oxygénée à 6% en agitant continuellement, jusqu'à ce que la terre soit parfaitement humectée. Le but de cette addition d'eau oxygénée est d'aider à la dispersion plutôt que de détruire les matières organiques. On recouvre le béc hier d'un verre de montre et on le place à l'étuve à 110° C pendant une heure. On ajoute ensuite 100 cm<sup>3</sup> d'eau distillée et le mélange est laissé au repos pendant au moins 18 heures. Après ce délai, on procède à la dispersion suivant le même procédé que dans le premier cas. Après dispersion, le mélange est transféré par lavage à l'eau distillée dans une éprouvette cylindrique de 18'' de hauteur et 2 1/2'' de diamètre et portant une graduation à 1000 cm<sup>3</sup>. On place l'éprouvette dans un bain maintenu par un thermostat à la température de 19,4° C et on ajoute de l'eau distillée ayant sensiblement cette température, jusqu'à parfaire le volume à 1000 cm<sup>3</sup>. Pendant cette opération, on agit fréquemment au moyen d'une tige en verre pour éviter le dépôt des particules. Lorsque la suspension a atteint la température du bain, on obture l'éprouvette au moyen de la paume de la main et on agit pendant une minute par retournements successifs.

A la fin de cette opération, on place l'éprouvette

dans le bain thermostatique et on déclenche un chronomètre.

Les deux premières lectures à l'aréomètre sont faites après 1 et 2 minutes. On lit à la partie supérieure du ménisque et au demi-gramme par litre. Les lectures ultérieures sont faites 5, 15, 30, 60, 250 et 1440 minutes après la fin de l'agitation à la main. Après chaque lecture, sauf la première, on retire délicatement l'aréomètre de la suspension de manière à ne pas occasionner de trouble et on l'essuie à l'aide d'un linge sec. Environ 15 secondes avant le moment fixé pour la lecture, on le place lentement et soigneusement dans la suspension et on ne fait la lecture que s'il est rigoureusement au repos.

Dès que la dernière lecture a été faite, la suspension est versée sur un tamis de 10.000 mailles par cm<sup>2</sup> (60 μ). On lave copieusement pour éliminer les grains de diamètre inférieur à cette dimension. La fraction restant sur le tamis est séchée à l'étuve à 110° C puis passée sur les tamis à mailles carrées suivants : 60, 88, 120, 150, 200, 250, 490, 750 et 1000 μ<sup>(2)</sup>.

Les chiffres nécessaires au tracé de la courbe granulométrique peuvent être calculés à partir des mesures effectuées à l'aréomètre et de la formule de Stokes.

Tout d'abord, il importe de calculer le poids sec exact de la terre mise en suspension en tenant compte éventuellement de la petite quantité de grains de diamètre supérieur à 2 mm ainsi que de la teneur en eau de l'échantillon.

D'autre part, l'aréomètre employé porte une graduation en grammes par litre de suspension. Le tarage de l'appareil a été fait pour une terre de densité 2,65 et à une température de 19,4° C. Lorsque l'on opère dans des conditions différentes, il faut donc affecter les lectures de certaines corrections.

En ce qui concerne la correction de température, on établit expérimentalement, pour chaque aréomètre, une courbe donnant, avec son signe, le terme correctif à ajouter à la lecture. Quant à la correction de densité, elle est égale à :

$$a = \frac{2,65 - \delta'}{2,65} \times \frac{\delta}{\delta - \delta'}$$

formule dans laquelle δ' est la densité de l'eau à la température de la suspension et δ la densité de l'échantillon. Lorsque l'on opère à la température de 19,4° C, δ' = 0,9984 et l'on peut calculer une fois pour toutes la valeur de a pour diverses valeurs habituelles de δ.

Il reste à calculer le diamètre maximum des grains encore en suspension aux temps auxquels

(2) D'après le Tentative Standard A. S. T. M. D. 422-38 T., la suspension est tamisée par voie humide sur le tamis de 74 μ, puis séchée et tamisée à sec sur la série de tamis 840 μ, 420 μ, 250 μ, 105 μ et 74 μ. Ces tamis sont normalisés d'après le Tentative Standard E. 11-38 T.-A. S. T. M. Proceedings vol. 38, part I, 1938, p. 1289-1295.

on a procédé à des mesures au moyen de l'aréomètre. Cela se fait en appliquant la formule de Stokes :

$$d = \sqrt{\frac{30 \eta l}{980 (\delta - \delta') t}}$$

dans laquelle :

$d$  est en mm le diamètre maximum des grains encore en suspension ;

$\eta$  est le coefficient de viscosité cinématique de la suspension, il est égal à 0,0102 poise à la température de 19,4° C ;

$l$  est en cm la longueur de sédimentation des particules ;

$\delta$  est la densité des particules de terre définie ci-dessus ;

$\delta'$  est la densité du milieu dispersif, définie ci-dessus ;

$t$  est la durée de sédimentation en minutes.

Pour rendre l'emploi de cette formule plus aisé, on calcule les diamètres  $d$  dans les conditions suivantes :  $l = 32,5$  cm ;  $\eta = 0,0102$  ;  $\delta = 2,65$  ;  $\delta' = 1$  ; on obtient, en fonction de  $t$ , les valeurs suivantes :

$t = 1$	$2$	$5$	$15$	$30$	$60$	$250$	$1440$	minutes
$d = 78$	$55$	$35$	$20$	$14$	$10$	$5$	$2$	$\mu$

Ces valeurs de  $d$  sont ensuite corrigées suivant les conditions de l'essai, par l'application de facteurs de correction calculés comme suit :

1) Lorsque la température à laquelle on opère est différente de 19,4° C, le coefficient de viscosité  $\eta$  est différent de 0,0102. Il convient de multiplier le diamètre calculé par la formule de Stokes par un coefficient

$$k_{\eta} = \sqrt{\frac{\eta'}{\eta}}$$

$\eta'$  est le coefficient de viscosité du milieu à la température de l'essai. La valeur de  $k_{\eta}$  peut être relevée sur un diagramme établi une fois pour toutes.

2) Lorsque la densité de la terre dispersée est différente de 2,65, il convient de multiplier le diamètre calculé par un coefficient

$$k_{\delta} = \sqrt{\frac{2,65 - 1}{\delta - 1}}$$

$\delta$  est la densité de la terre mise en suspension. La valeur de  $k_{\delta}$  peut également être relevée sur un diagramme établi à l'avance.

3) La lecture à l'aréomètre dépend du nombre, du diamètre et de la densité des particules présentes dans la partie de la suspension soutenant l'aréomètre et non des particules existant sur toute la hauteur de 32,5 cm. D'autre part la densité de la suspension n'est pas constante sur la hauteur de l'aréomètre. On a déterminé expérimentalement que la longueur  $l'$  à introduire dans la formule est égale aux 42/100 de la longueur de la partie immergée de

l'appareil. Il convient donc de multiplier le diamètre calculé par un coefficient

$$k_l = \sqrt{\frac{l'}{l}}$$

dans lequel  $l = 32,5$  cm et  $l'$  les 42/100 de la distance entre le niveau de la suspension et l'extrémité inférieure de l'aréomètre ; cette longueur varie avec la lecture faite. La valeur du coefficient  $k_l$  peut être relevée sur un diagramme qu'il y a lieu de tracer une fois pour toutes pour chaque aréomètre.

Le diamètre maximum réel des grains encore en suspension aux temps indiqués et dans les conditions de l'expérience est donc :

$$D = d \times k_{\eta} \times k_{\delta} \times k_l$$

En général  $D$  est voisin de  $\frac{d}{2}$ ,  $k_{\eta}$  et  $k_{\delta}$  sont voisins de 1 et  $k_l$  est voisin de 0,5.

On peut, de la sorte, en reportant sur un diagramme les valeurs des diamètres calculées et corrigées comme il vient d'être dit, tracer la courbe granulométrique de la terre analysée, entre les diamètres de 1 et 40  $\mu$  environ. La branche de la courbe correspondant aux diamètres supérieurs à 60  $\mu$  est obtenue en reportant les refus cumulés sur les tamis indiqués plus haut. On emploie en général du papier millimétré à échelle des abscisses logarithmique.

Cette méthode, telle qu'elle vient d'être décrite, convient bien pour l'analyse des terres sableuses. Lorsque la proportion de grains fins devient plus importante, elle laisse subsister des doutes quant à la dispersion de l'échantillon et à la défloculation.

A ce point de vue on peut faire certaines remarques et quelques suggestions.

Tout d'abord on peut noter au sujet de la prise d'échantillon qu'il est préférable d'opérer sur de la terre contenant encore son eau naturelle plutôt que de la sécher comme le préconise l'A. S. T. M. (3).

Lorsque l'on analyse deux échantillons de la même terre prélevés l'un sec et l'autre humide, la courbe granulométrique du premier échantillon est le plus souvent située en dessous de l'autre dans la région des faibles diamètres. Ce qui semble indiquer que la dispersion est obtenue plus facilement lorsque l'échantillon mis en suspension contient encore son eau naturelle. Le mode opératoire ne diffère guère de la méthode préconisée par l'A. S. T. M. Il suffit, pour éliminer les grains de diamètre supérieur à 2 mm, de faire passer l'échantillon éventuellement imbibé à l'eau distillée, à travers le tamis adéquat par une légère pression du pouce. De plus il faut prélever un échantillon un peu plus important de façon à mettre en suspension environ 50 gr de terre sèche.

(3) Tentative Standard D 421-38 T - A.S.T.M. Proceedings, Vol. 38, Part. 1, 1938, pp. 942-943.

A l'appui de ces considérations, on peut citer les essais suivants.

On a effectué, sur une même terre très argileuse, trois essais sur échantillons prélevés humides et trois essais sur échantillons identiques mais après séchage à l'air. Les courbes relatives aux échantillons prélevés avec leur eau naturelle ne se distinguent pas de celles relatives aux échantillons analysés après séchage.

Par contre, dans d'autres cas, et notamment pour du limon hesbayen, la courbe relative à l'échantillon prélevé avec son eau naturelle est supérieure à celle relative à l'échantillon analysé après séchage.

En ce qui concerne la dispersion, l'A. S. T. M. préconise deux méthodes, l'une applicable aux terres dont l'indice de plasticité est plus petit que 20 et l'autre aux terres dont l'indice est supérieur à 20. La première donne de bons résultats. Il n'en est pas de même pour la seconde qui ne donne pas toujours satisfaction. Nous avons amélioré cette méthode de façon à rendre son emploi plus sûr même pour les terres les plus fines et nous avons décidé de l'employer pour tous les sols quel que soit leur indice de plasticité.

Après addition de 100 cm<sup>3</sup> d'eau oxygénée et un repos d'une heure, on porte à l'ébullition pendant une heure tout en agitant au moyen de l'agitateur mécanique. On laisse au repos pendant 18 heures au moins. On ajoute ensuite le défloculant et on agite de nouveau mécaniquement pendant une heure en chauffant modérément (50° C).

Cette façon de procéder nous a donné entière satisfaction pour les terres les plus fines que nous ayons eu à analyser (proportion de particules < 1  $\mu$  : 78%).

Il importe de faire une dernière remarque au sujet du tamisage : lorsqu'on lave sur le tamis de 10.000 mailles par cm<sup>2</sup>, il est indispensable d'employer de l'eau distillée pour éviter la floculation du résidu sur le tamis comme nous avons pu l'observer à maintes reprises.

Une autre question assez délicate est celle de savoir quel défloculant il faut employer et sous quelle concentration.

Nous avons procédé à différents essais sur une même terre très fine en employant le silicate de soude comme l'indique l'A. S. T. M., mais avec des concentrations différentes. Au lieu de 20 cc d'une solution de silicate de 1,023 de densité, nous avons employé respectivement 5, 10, 15, 20, 25 et 50 cc de la même solution. Les diagrammes (4) montrent que, pour la terre analysée, il faut employer au moins 10 cc de la solution ; en effet, la courbe relative à l'essai pour lequel on a employé 5 cc de la solution montre qu'il y a floculation des grains les plus fins. Par contre il n'y a pas avantage à augmenter la concentration en silicate de soude car les différences constatées entre les autres courbes sont de l'ordre

de grandeur des erreurs de dispersion de la méthode comme on l'indiquera ultérieurement.

Nous avons procédé de même sur quatre échantillons de la même terre en employant des quantités différentes d'oxalate ammonique. La méthode est identique sauf l'emploi respectivement de 25, 50, 75 et 100 cc d'une solution 1/4 N d'oxalate ammonique (17 gr/litre). Ce sont les courbes 13.409 g, h, i, et j. On voit qu'il faut employer au moins 75 cc de la solution et qu'il est inutile d'augmenter la concentration. On voit également que la quantité de grains fins déterminée en employant l'oxalate ammonique est plus grande que celle trouvée en employant le silicate de soude. Ces chiffres sont en effet de 78% dans le premier cas et 65% dans le second. Ces constatations confirment les essais de M. Bauer relatés dans les Rapports Techniques du 41<sup>e</sup> Congrès de l'A. S. T. M. (1938), qui ont montré qu'à chaque sol correspond un défloculant le plus efficace, dont il faut également déterminer la concentration la plus efficace. On peut noter à ce sujet qu'un léger excès de défloculant ne nuit pas, à condition de tenir compte de l'augmentation de la densité de la suspension due à la présence du composé chimique ajouté. Il y aurait donc lieu de poursuivre les recherches dans ce sens pour arriver à choisir quelques défloculants et de déterminer pour chacun d'eux la concentration qui donnerait satisfaction dans chaque cas.

Quelques essais effectués en employant le pyrophosphate de soude, comme le conseille Andreasen, ont montré que les résultats sont identiques à ceux obtenus par l'emploi du silicate de soude.

D'autre part des essais qualitatifs ont montré que l'action de l'ammoniaque employé comme défloculant n'est pas effective.

A titre indicatif, on peut montrer que la précision de la méthode préconisée par l'A. S. T. M. est suffisante pour déceler les différences de composition granulométrique d'échantillons d'un limon prélevés à des profondeurs différentes. C'est ce que montrent les essais n° 13.703 a, b, c et d (5). Ils sont relatifs à des échantillons prélevés sur une même verticale à 0,20 m l'un de l'autre. On voit que la teneur en grains fins augmente lorsque l'on se rapproche de la surface du gisement.

Afin de se rendre compte de la précision de la méthode, on reviendra aux essais effectués sur des échantillons multiples d'une même terre, dont il a été question plus haut, et on examinera les différentes causes d'erreur.

Tout d'abord, la prise d'échantillon, qui se fait par la méthode du partage en quatre, ne donne pas des échantillons identiques malgré toutes les précautions que l'on peut prendre. A ce sujet, il apparaît que l'échantillonnage est plus aisé sur matière sèche que sur matière humide ; dans ce dernier cas, il s'ajoute une incertitude sur l'égale humidité de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique

(4) Ces diagrammes, comme les autres figures destinées à illustrer cet article, ont été détruits par faits de guerre et n'ont pu être reconstitués.

(5) Même remarque que sous (4).

et de celui qui sert à la détermination de la teneur en eau.

En second lieu, il faut observer que la lecture à l'aréomètre doit se faire avec grande précision. Dans les cas courants et pour une terre argileuse, une demi-division de l'aréomètre correspond à 1,2% du poids total des matières en suspension. Afin de faciliter la lecture, qui est souvent gênée par la présence de mousse à la surface de la suspension, on se sert d'un appareil semblable aux limnimètres utilisés en hydraulique, mais dont la pointe est remplacée par un plateau que l'on amène en contact avec la partie supérieure de l'aréomètre.

A ce propos, il faut avoir soin de plonger l'aréomètre dans le liquide légèrement plus bas que sa position d'équilibre; suivant que le ménisque se forme sur une partie de la tige préalablement mouillée ou non, il peut se produire une différence d'enfoncement atteignant  $\frac{3}{4}$  de graduation, c'est-à-dire d'environ 1,8% du poids total des matières mises en suspension. Une erreur sur la détermination de la densité absolue moyenne n'a pas grande influence sur les résultats. La densité absolue n'intervient en effet que par l'intermédiaire d'un coefficient voisin de 1 dont la variation est faible.

Il faut remarquer à ce sujet que la densité absolue déterminée est la densité moyenne des différents grains constituant la terre et que leur densité propre peut varier dans de larges proportions jusqu'à descendre à 2,00 pour certaines fractions argileuses. Si l'on ajoute l'influence de la forme lamellaire des grains d'argile, on constate que les diamètres calculés par la formule de Stokes sont inférieurs aux dimensions maxima réelles des particules.

Un point plus délicat est constitué par le raccordement du tronçon de courbe obtenu par la méthode de l'aréomètre et du tronçon obtenu par tamisage. Bien que l'analyse des particules  $< 60 \mu$  ou  $74 \mu$  ait été effectuée par sédimentation, l'opération du tamisage reste délicate pour les terres fines tendant à floculer. Des expériences comparatives ont montré que l'on pouvait, dans certains cas, avoir des écarts appréciables selon que le tamisage était fait à sec ou par voie humide, même pour des fractions de grosseur allant jusqu'à  $200 \mu$ . Dans d'autres cas, les différences étaient de l'ordre de grandeur des écarts. Les deux méthodes de tamisage, par voie sèche et par voie humide, peuvent

être entachées d'erreur. Il semble donc que l'on puisse adopter la méthode mixte de l'A. S. T. M. du tamisage par voie humide sur le tamis le plus fin ( $74 \mu$  d'après l'A. S. T. M., en dernier lieu  $60 \mu$  dans notre laboratoire) suivi du tamisage à sec sur la série des tamis supérieurs auxquels, selon l'A. S. T. M., il faut joindre le plus fin de  $74 \mu$ , pour assurer un bon raccordement des deux parties de la courbe granulométrique. Nous poursuivons le même résultat en employant comme tamis le plus fin pour le tamisage à sec, celui de  $60 \mu$ , qui a servi au tamisage humide. Cet abaissement de la limite inférieure de tamisage assure une analyse plus poussée et réduit la marge d'erreur compatible avec un raccordement correct des deux tronçons de la courbe granulométrique; il exige donc automatiquement un très grand soin dans les opérations.

Les tamis employés sont des tamis à mailles carrées. La plus grande dimension des particules ayant traversé un tamis peut donc être voisine de la diagonale de la maille à condition que ces particules présentent une forme allongée. D'autres particules dont la forme se rapprocherait de la sphère et de dimension maximum plus faible seront retenues sur ce même tamis. On voit qu'il y a une incertitude sur les dimensions réelles des grains retenus sur un tamis déterminé.

D'autre part, la formule de Stokes suppose que les grains soient sphériques. On raccorde donc deux tronçons de courbe représentant des caractéristiques différentes des grains constituant un sol, bien que la forme lamellaire des grains d'argile conduise dans chaque cas à admettre un diamètre inférieur à la dimension maxima réelle.

Andreasen, qui remplace la méthode de l'aréomètre par la méthode de la pipette, propose de caractériser chaque fraction classée par l'analyse granulométrique par la longueur de l'arête du cube dont le volume est égal à la moyenne des volumes des particules constituant la fraction.

Il résulte de ce qui précède que la méthode de l'Association américaine pour l'essai des matériaux en vue de l'analyse granulométrique des sols répond aux desiderata de la géotechnique, à condition d'abord de la perfectionner au point de vue de la défloculation, ensuite d'opérer avec un très grand soin et, enfin, d'interpréter les résultats en tenant compte de la façon dont ils ont été obtenus.