

MÉTHODES D'ANALYSES

utilisées au laboratoire de physique des sols

SSC - ORSTOM - Bondy



MÉTHODES D'ANALYSES

utilisées au laboratoire de physique des sols

SSC - ORSTOM - Bondy

- Dosage de l'humidité
- Analyse granulométrique des sols (calcaires ou non)
- Analyse granulométrique par densimétrie
- Mesure de la densité apparente
- Mesure de la densité réelle
- Porosité des mottes
- Résistance à la pénétration
- Stabilité structurale
 - Indice d'instabilité structurale
 - Vitesse de filtration
- Etablissement des profils hydriques
- Courbes humidité/pF
- Limites d'Atterberg
 - Limite de Liquidité
 - Limite de Plasticité

DOSAGE DE L'HUMIDITÉ

Méthode par séchage à l'étuve à 105-110°

- Peser dans une boîte à tare, préalablement tarée, un poids exactement connu de terre tamisée à 2 mm (environ 5 g).
- Porter la boîte ouverte et son couvercle à l'étuve pendant quatre à six heures.
- Boucher la boîte, la retirer de l'étuve et laisser refroidir dans un dessiccateur.
- Peser.

Le taux d'humidité se déduit des pesées suivantes :

p = Boîte à tare

p' = Boîte à tare + terre séchée à l'air

p'' = Boîte à tare + terre séchée à 105°

La teneur en eau en % de la terre séchée à l'air est de :

$$\text{H}_2\text{O} \% = \frac{p' - p''}{p' - p} \times 100.$$

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE DES SOLS ***(Calcaires ou non)***

A - DISPERSION DE LA TERRE

1 - Destruction de la matière organique

- Peser 10 g de terre fine séchée à l'air (20 g pour les sols très sableux) dans un bécher de 600 ml.
- Ajouter 50 ml d'eau oxygénée (20 à 50 volumes).
- Laisser au repos une nuit.
- Porter sur plaque chauffante (éviter une ébullition trop forte, car l'eau oxygénée serait décomposée trop rapidement).
- Renouveler les additions d'eau oxygénée jusqu'à destruction complète de la matière organique.
- Éliminer entièrement l'excès d'eau oxygénée en faisant bouillir et, au besoin, en ajoutant quelques gouttes d'ammoniaque.

2 - Dispersion proprement dite

- Transvaser en allonge.
- Ajouter de l'eau distillée jusqu'à 300 à 400 ml.
- Ajouter 25 ml d'une solution de pyrophosphate ou d'hexamétaphosphate de sodium à 40 g/l.
- Agiter deux heures à l'agitateur mécanique.

B - ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PROPREMENT DITE

- Amener la suspension à 1 litre avec de l'eau distillée.
- Agiter énergiquement par retournements en s'assurant que tout le dépôt qui a pu se faire au fond de l'allonge est entièrement remis en suspension.
- Abandonner l'allonge débouchée sur une pailleasse loin de toute source de chaleur pendant le temps correspondant aux particules à prélever.

1 - Argile + Limon

- Au bout de 4 minutes 48 secondes à 20°, on prélève à 10 cm de profondeur une partie aliquote (20 ml, soit 1/50) de la fraction argile + limon (il est nécessaire de toujours commencer par le prélèvement de cette fraction pour que le deuxième prélèvement, celui de l'argile, corresponde à 1/50 de l'argile totale. En opérant en sens inverse on obtiendrait 1/50 de l'argile et 1/49 de la fraction argile + limon).

- Fermer le robinet à trois voies.
- Descendre la pipette jusqu'à ce que la pointe touche le niveau supérieur de la suspension et noter la position de l'index sur la règle graduée ; 20 à 30 secondes avant la fin du délai de sédimentation déterminé par le tableau 1 de la température de la suspension, descendre la pipette de 10 cm.
- Ouvrir lentement le robinet et, au temps voulu, aspirer pour remplir doucement la pipette en 10 secondes réparties également de part et d'autre du temps de chute pour 10 cm.
- Lorsque le liquide arrive au-dessus du robinet, fermer celui-ci.
- Vider le trop-plein par l'ajutage latéral.
- Remonter la pipette et vider son contenu dans une boîte à tare de 50 ml environ.
- Evaporer à sec, sécher à l'étuve à 105° et peser le résidu sec.
- Calculer la correction à apporter aux résultats en prélevant une fraction aliquote d'une solution contenant pour 1 000 ml, 25 ml de la solution de pyrophosphate de sodium utilisée comme dispersant.

2 - Argile

- Opérer exactement de la même façon après repos de huit heures à 20°. Suivant la température moyenne de la suspension, modifier à l'aide du tableau le temps de sédimentation, ou, si celui-ci ne convient pas, adopter la profondeur correspondant au temps choisi.

3 - Sables

- Eliminer ensemble l'argile et le limon par décantations successives, en adoptant le temps de sédimentation du limon comme dans la méthode précédente, mais en ajoutant à chaque fois, sauf au dernier lavage, un peu d'agent dispersant (3 ml de pyrophosphate de sodium). Opérer de préférence sur une hauteur de sédimentation de 20 cm.
- Fractionner ensuite les sables par tamisage (tamis à maille de 50 et 200 μ).

EXPRESSION DES RÉSULTATS

Soit, en grammes :

- a - le poids d'argile prélevé dans 20 ml
 - b - le poids d'argile et de limon prélevé dans 20 ml
 - c - le poids de limon grossier
 - d - le poids des sables fins
 - e - le poids des sables grossiers.
- } après avoir effectué la correction
} due au poids de pyrophosphate

La prise d'essai étant de 10 g, on a, en % de la terre séchée à l'air :

$$\text{argile \%} \dots\dots\dots a \times \frac{1\,000 \times 100}{20 \times 10} = a \times 500$$

$$\boxed{A \% = \frac{a}{2} \text{ mg}}$$

$$\text{limon \%} \dots\dots\dots \frac{(b - a) \times 1\,000 \times 100}{20 \times 10} = 500 (b - a)$$

$$\boxed{L \% = \frac{b}{2} \text{ mg} - \frac{a}{2} \text{ mg}}$$

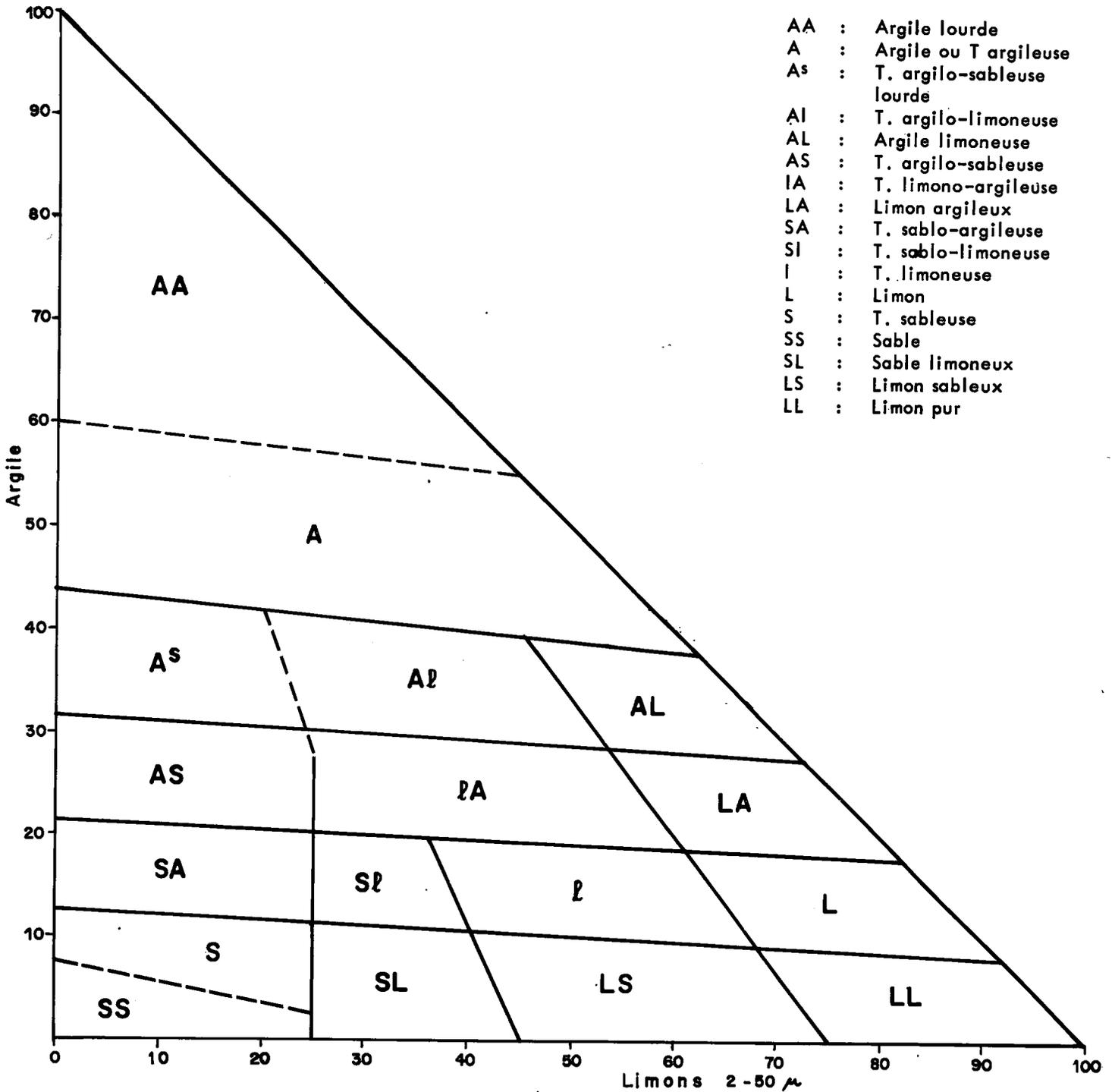
limon grossier % 10 c

sables fins % 10 d

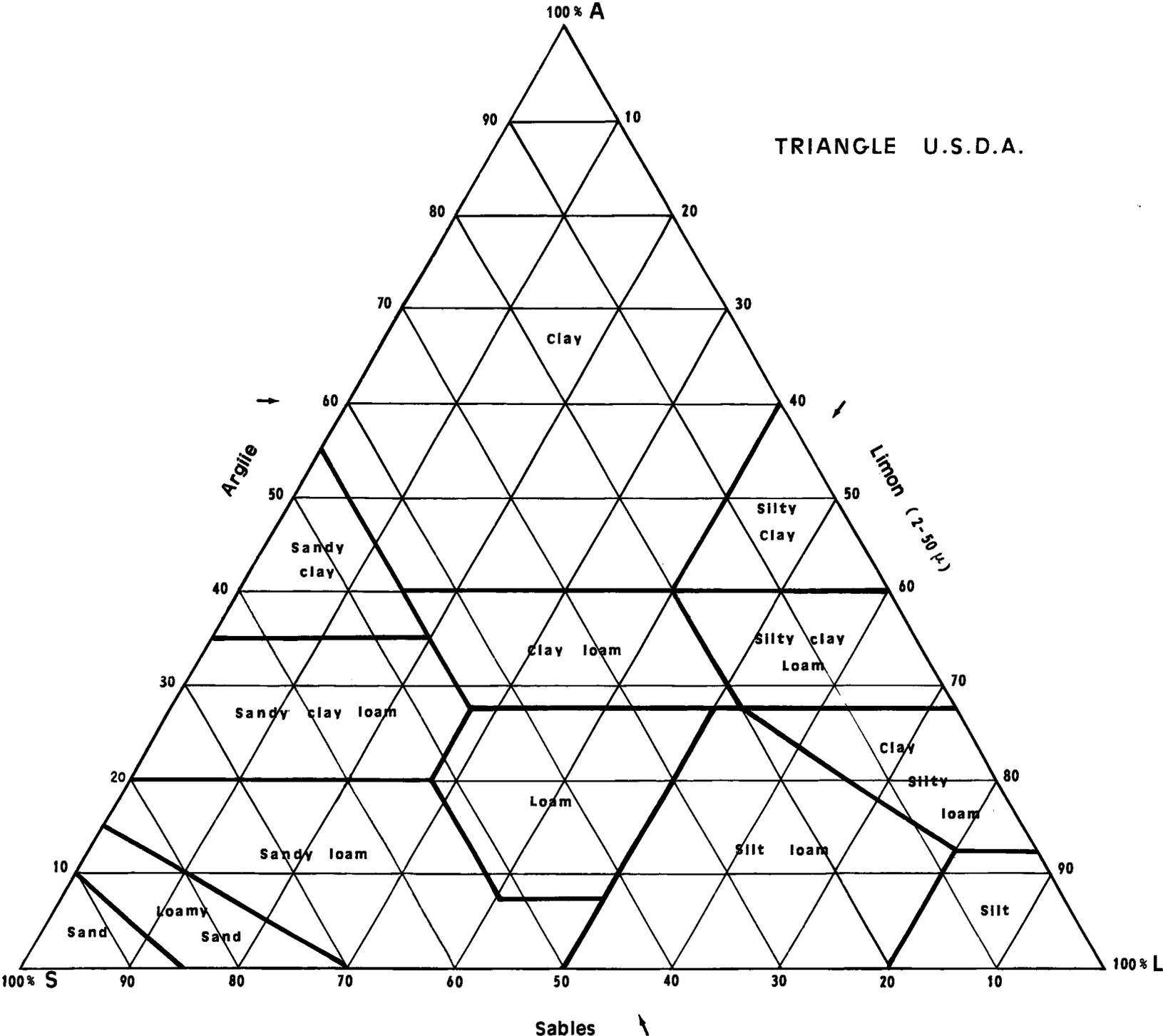
sables grossiers % 10 e

Températures C°	Particules de 0,002 mm de Ø				Particules de 0,02 mm de Ø Temps de chute pour 10 cm en minutes-secondes
	Temps de chute pour 10 cm en heures-minutes	Profondeur de décantation ou de prélèvement en cm après :			
		8 h	7 h	6 h	
15	9.05	8.8	7.7	6.6	5.27
16	8.51	9.0	7.9	6.8	5.19
17	8.37	9.3	8.1	7.0	5.10
18	8.24	9.5	8.3	7.2	5.03
19	8.12	9.8	8.6	7.3	4.55
20	8.00	10.0	8.8	7.5	4.48
21	7.48	10.3	9.0	7.7	4.41
22	7.37	10.5	9.2	7.9	4.34
23	7.26	10.8	9.4	8.1	4.28
24	7.16	11.0	9.7	8.3	4.22
25	7.06	11.3	9.9	8.5	4.15

TRIANGLE DES TEXTURES (I.N.R.A.)



TRIANGLE U.S.D.A.



ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR DENSIMÉTRIE

- Opérer sur 30 g de terre.
- Destruction de la matière organique par H_2O_2 .
- Recueillir l'échantillon dans une bouteille de lait (moins de 500 cc).
- Addition hexamétaphosphate (40 cm³).
- Agitation : 2 heures.
- Faire passer dans une éprouvette graduée de 1 litre.
- Ajuster à 1 l. Noter la température de la suspension.
- Agiter par retournement.
- Reposer l'éprouvette sur la paille et faire immédiatement démarrer le chronomètre.
- Introduire doucement le densimètre. Le maintenir au centre de l'éprouvette à l'aide d'un guide.
- Faire les lectures densimétriques au sommet du ménisque selon le tableau de marche ci-joint.
- Arrêter les lectures lorsqu'on a atteint la dimension inférieure voulue (15 à 24 h). Représenter graphiquement les densités lues en fonction du temps (échelle semi-logarithmique).
- La récupération des sables se fait sur tamis de 50 μ . Verser le contenu de l'éprouvette sur le tamis et laver à l'eau sous le robinet. Récupérer les sables dans une capsule de porcelaine de 500 cc. Sécher. Tamiser.

CALCUL DES RÉSULTATS

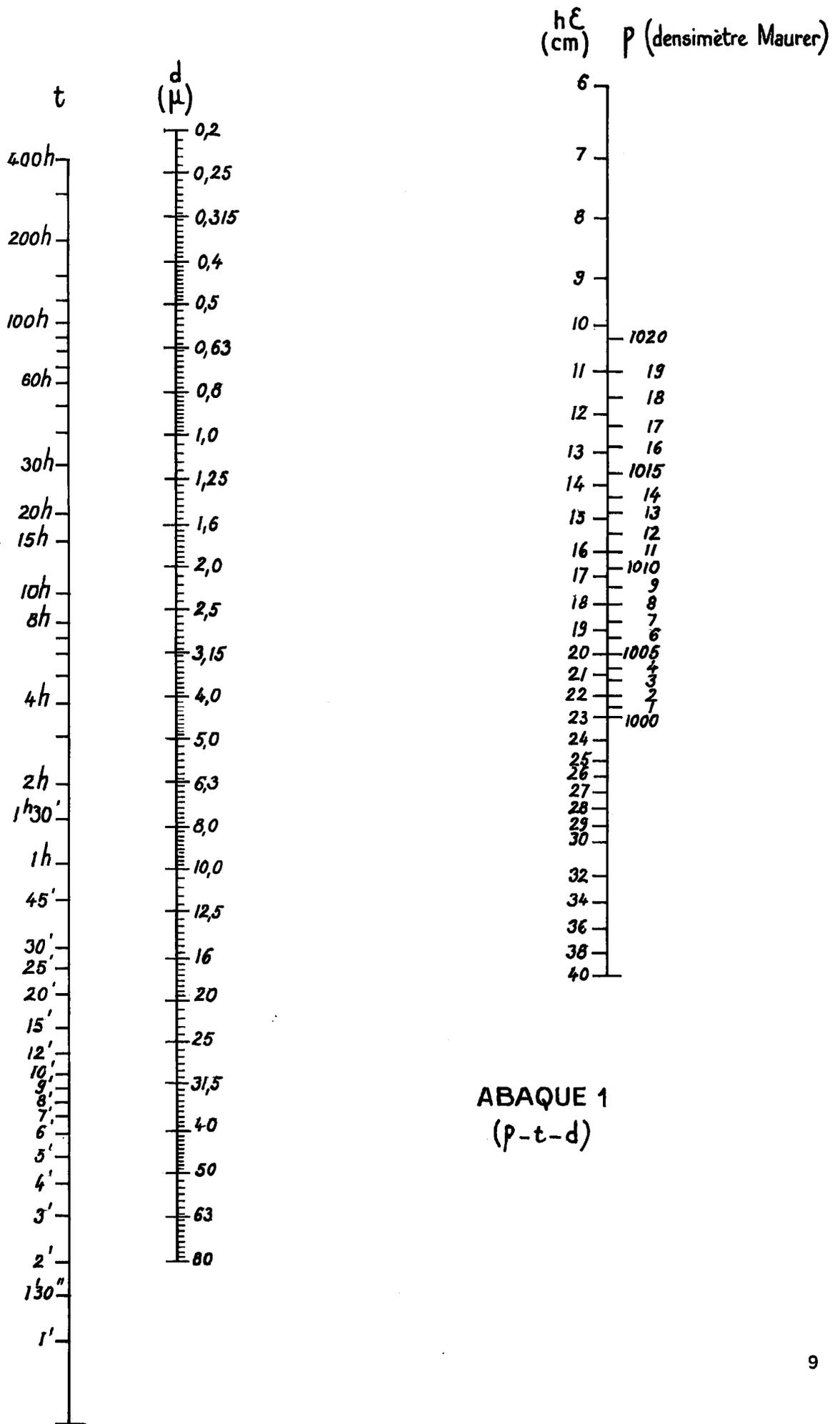
A - TRANSFORMATION DES TEMPS EN DIAMÈTRES

- Utiliser l'abaque I.
- Soient ρ et t les valeurs connues. Les joindre par une droite. L'intersection avec l'axe d donne la valeur du diamètre correspondant en microns.

B - TRANSFORMATION DES DENSITÉS EN POURCENTAGES CUMULÉS

- Utiliser l'abaque II.
- Soit ρ_2 la densité du milieu dispersant (eau + 40 cc d'hexa.).
Soit ρ_1 la densité de la suspension au temps t .
- Réunir les points correspondants au moyen d'une droite et lire sur l'axe P la valeur du pourcentage cumulé à cet instant t . (Pourcentage cumulé = somme des pourcentages des particules de diamètre égal ou inférieur à une dimension donnée).

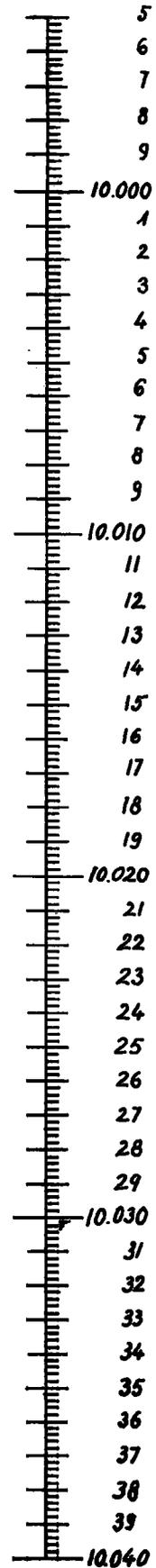
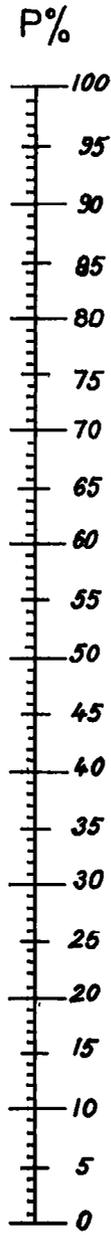
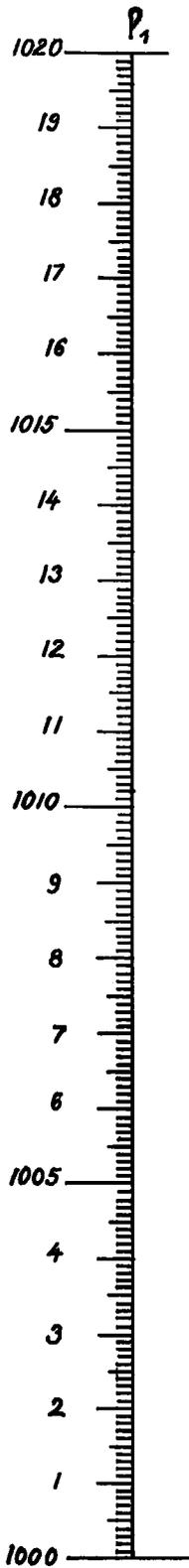
(1) - Bull. A.F.E.S., sept. 1957.



ABAQUE 1
(p-t-d)

ABAQUE 2

(P% - P₁ - P₂ -)



C - CORRECTION DE TEMPERATURE

- Ajouter à la valeur de P les chiffres donnés par le tableau de corrections ci-dessous.

Corrections de températures.

10°	- 6,69
11°	- 6,26
12°	- 5,83
13°	- 5,35
14°	- 4,71
15°	- 4,06
16°	- 3,37
17°	- 2,67
18°	- 1,87
19°	- 0,96
20°	- 0
21°	+ 0,98
22°	+ 2,03
23°	+ 3,10
24°	+ 4,17
25°	+ 5,46
26°	+ 6,74
27°	+ 8,08
28°	+ 9,36
29°	+11,00

Tableau de lecture

Heure	Temps	Température	Densité ρ	P %	Correction	Pr %
	30"					
	45"					
	1'					
	1'30"					
	3'					
	5'					
	7'					
	11"					
	15'					
	20'					
	45'					
	1h30					
	4h					
	8h					
	14h					
	24h					

MESURE DE LA DENSITÉ APPARENTE

MATÉRIEL UTILISÉ

- Cylindres de laiton de 100 cm³, à bord inférieur coupant, numérotés.
- Masse-guide pour la mise en place.

- Enfoncer le cylindre dans le sol, en évitant de tasser la terre à l'intérieur du cylindre. Utiliser pour cela la masse-guide et un marteau petit ou moyen.
- Retirer la motte de terre dans laquelle le cylindre a été enfoncé. Nettoyer l'extérieur du cylindre et araser soigneusement les deux extrémités.
- Peser à l'état humide, puis porter à l'étuve à 105°, et peser à sec.
- Récupérer la totalité de la terre, et la désagréger sur tamis de 2 mm et sous l'eau pour recueillir éventuellement les graviers et cailloux.
- Peser les graviers et déterminer leur volume au pycnomètre ou à l'éprouvette graduée.
- Calculer la densité apparente : à l'état humide, à l'état sec, et avec et sans graviers.
- Il faut exécuter au minimum cinq répétitions.

MESURE DE LA DENSITÉ RÉELLE

On utilise un pycnomètre d'une capacité de 50 cm³ environ :

On effectue successivement les pesées suivantes :

- a - pycnomètre vide,
- b - pycnomètre rempli d'eau,
- c - pycnomètre contenant le sol à étudier (environ 15 g),
- d - pycnomètre + sol + eau.

En pratique, opérer dans l'ordre a, c, d, b.

On en tire la densité réelle $D = \frac{\text{poids de terre}}{\text{volume de terre}}$

Poids de terre = c - a.

Volume de terre = volume du pycnomètre (b - a) moins volume d'eau ajouté pour compléter le pycnomètre (d - c)

$$(b - a) - (d - c) = (b + c) - (a + d).$$

$$D = \frac{c - a}{(b + c) - (a + d)}$$

Il faut donc réaliser les quatre pesées suivantes :

1 - PYCNOMÈTRE VIDE

Nettoyer le pycnomètre (en principe à l'eau, puis à l'alcool, puis à l'éther). Sécher à l'étuve à 105°. Placer en dessiccateur. Peser.

2 - PYCNOMÈTRE + EAU

On emploie de l'eau distillée (en fait "échangée") préalablement dégazée par ébullition, ou sous vide, mais toujours à la température ambiante. On en remplit le pycnomètre, puis on ajuste le bouchon creux.

On ajuste au trait de repère à l'aide de minces bandes de papier filtre enroulées, qui permettent d'enlever le film d'eau qui adhère aux parois du tube capillaire au-dessus du repère. Le bouchon doit être bien assujéti dans le goulot : quand on essuie l'extérieur du pycnomètre, près du col le niveau du liquide ne doit pas varier dans le tube capillaire. Ne pas tenir la partie renflée du pycnomètre avec la main, afin d'éviter les causes d'erreurs dues aux variations de la température. On le tiendra avec deux doigts au niveau du col.

3 - PYCNOMÈTRE + TERRE

Après avoir vidé l'eau et séché le pycnomètre, on y introduit environ 15 g de terre qu'on pèse ensuite exactement. On prend de la terre passée au tamis à trous ronds de 2 mm, séchée à l'étuve à 105° et ramenée à la température ambiante.

4 - PYCNOMÈTRE + TERRE + EAU

C'est l'opération la plus délicate de la manipulation. Se fait en deux temps :

- a - on imbibe la terre et on la recouvre d'environ 1 cm d'eau. On place le pycnomètre sous une cloche à vide aussi longtemps qu'il le faut pour qu'il n'y ait plus de dégagement de bulles d'air. Ceci demande en général 1 heure. Il est bon d'agiter au moins une fois pour modifier la position des particules qui ont décanté et faciliter le départ de l'air emprisonné entre elles.
- b - on termine le remplissage à l'eau distillée dégazée, en prenant soin de ne pas perdre les particules de débris végétaux entraînés à la surface de l'eau.

On fait trois essais et on prend la moyenne.

POROSITÉ DES MOTTES

Utiliser un trébuchet (avec butées) dont le plateau de gauche sera remplacé par un filet en fil métallique très fin (donc de volume négligeable) où seront placées les mottes à peser.

- Dans de la terre séchée à l'air, choisir une motte d'environ 30 g.
- Mettre sécher à l'étuve et peser : (p1).
- Imbiber ensuite cette motte de pétrole ; pour cela, la placer dans une capsule de porcelaine ; recouvrir entièrement de pétrole ; placer la capsule dans un dessiccateur et faire le vide pendant une demi-heure (jusqu'à cessation du dégagement gazeux).
- Sortir la motte et laisser ressuyer sur toile métallique en atmosphère de pétrole (un quart d'heure).
- Eponger le pétrole resté en surface de la motte en la faisant rouler sur une feuille de papier filtre.
- Peser la motte imbibée : (p2).
- Peser aussitôt après la motte imbibée en l'immergeant dans un bécher contenant du pétrole : (p3).

- Porosité P = $\frac{\text{Volume du pétrole absorbé par la motte}}{\text{Volume total de la motte}} \times 100$

$$= \frac{\frac{p2 - p1}{d}}{\frac{p2 - p3}{d}} \times 100 = \frac{p2 - p1}{p2 - p3} \times 100$$

RÉSISTANCE A LA PÉNÉTRATION

- Utiliser un pénétromètre à percussion et masselotte.
- Employer les masselottes mobiles de 0,500 ou 1,000 kg, et régler la butée pour des hauteurs de chute de 0,50 ou 1 m.
- Noter pour chaque coup de masselotte :
 - a - la masse,
 - b - la hauteur de chute,
 - c - la profondeur d'enfoncement.
- Tracer le graphique 1 de la profondeur atteinte en fonction de l'énergie cumulée depuis le début de l'expérience.
- A partir du graphique 1, tracer le graphique 2 représentant l'énergie dépensée pour traverser chaque tranche de 2 cm de profondeur, en fonction de la profondeur.
- Effectuer trois répétitions par mesure.

STABILITÉ STRUCTURALE

- PRINCIPE DE LA MÉTHODE

1 - Détermination de l'indice d'instabilité structurale - I_s

a - L'un des facteurs de cet indice est le pourcentage d'agrégats, compris entre 0,2 et 2 mm, stables à l'eau.

Un prétraitement à l'alcool α , en général, un effet protecteur sur la structure et accroît le taux d'agrégats stables.

Un prétraitement au benzène γ , au contraire, un effet sensibilisateur sauf sur les terres riches en matière organique.

On détermine donc le taux d'agrégats stables :

α - sans prétraitement (témoin),

β - après prétraitement à l'alcool,

γ - après un prétraitement au benzène.

Le pourcentage d'agrégats stables sera la moyenne arithmétique des trois chiffres obtenus.

b - Le second facteur de l'indice I_s est l'aptitude de la terre étudiée à se disperser. On déterminera donc la fraction (argile + limon) (plus représentative que la fraction argile) dans les trois cas.

On se placera dans les conditions les plus défavorables en prenant le chiffre maximum pour cette fraction (ce chiffre est en général celui obtenu avec le témoin, ou, le plus souvent, avec le prétraitement au benzène - mais il importe de faire les trois déterminations).

c - La fraction sable grossier jouant un rôle important dans le taux d'agrégats stables obtenus, il importe d'en tenir compte, d'où la formule permettant finalement de calculer I_s :

$$I_s = \frac{(A + L) \text{ maximum}}{\text{Moyenne agrégats grossiers} - 0,9 \text{ S.G.}}$$

(Le facteur 0,9 est choisi pour tenir compte des variations possibles dans le taux d'éléments grossiers des sols pauvres en sables).

En conséquence, plus le sol étudié est stable, plus l'indice I_s sera faible.

2 - Test de perméabilité

Cette détermination exécutée sur l'échantillon remanié (terre tamisée comme il est dit plus loin), a pour but de calculer le coefficient K de la loi de Darcy :

$$Q = \frac{K h \times s}{l} \text{ d'où } K = \frac{Q l}{h s}$$

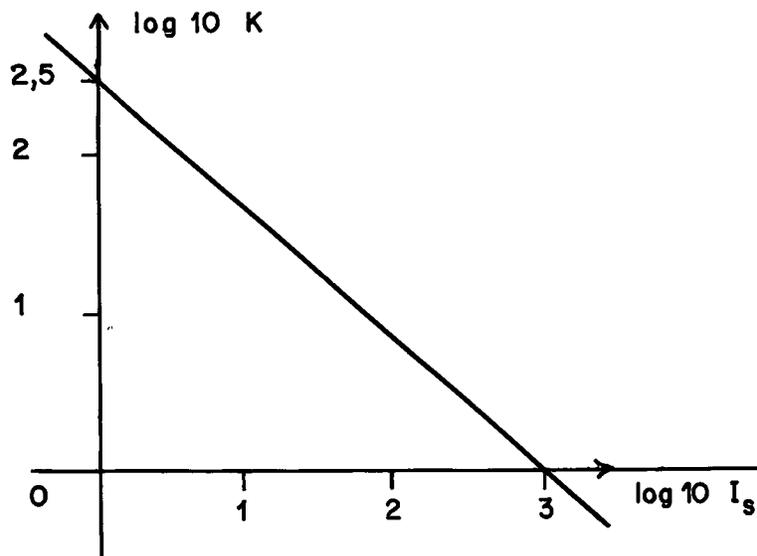
Q = débit horaire,
h = charge,
s = surface
l = hauteur de la colonne de terre.

La terre est soumise à une charge d'eau constante, dans un tube calibré et l'on mesure la quantité d'eau qui la traverse pendant une heure (Q). On connaît h, s et l. D'où la valeur de K (pente motrice, en cm/heure).

3 - Représentation des résultats

On constate l'existence d'une corrélation entre les valeurs obtenues pour I_s et K. Pour des raisons de commodité dans la représentation graphique, on porte en abscisses le logarithme de ($I_s \times 10$) et en ordonnée le logarithme de ($K \times 10$).

Les sols se répartissent comme il est indiqué ci-dessous :



B - PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

- Choisir des mottes n'ayant pas été abîmées au contact du piochon ou de la pelle lors du prélèvement. Laisser sécher à l'air.
- Tamiser la terre sur tamis module NFX 11.501, 2 mm, **frous carrés** (tamis \varnothing 10 cm). La terre doit être forcée à la main à travers ce tamis. Tamiser fréquemment pour obtenir le maximum d'agrégats intacts.
- Si les mottes sont très dures, et s'il n'est **absolument** pas possible de les forcer à la main, on pourra utiliser le mortier, mais à condition d'opérer avec ménagement, et de tamiser très souvent. Ce procédé est vivement déconseillé.
- Il convient de tamiser au moins 500 g et, de préférence, entre 500 et 800 g.
- L'échantillonnage au cours des pesées est très délicat. Étendre la terre en une couche de 1 cm d'épaisseur, dans un plateau (30 x 20 cm environ). Éviter de secouer le plateau, ce qui entraînerait un triage de particules.
- Prélever les 10 g nécessaires à l'étude de I_s en cinq à six prises réparties sur le plateau, les 50 g pour l'étude de la perméabilité en une dizaine de prises.

C - TECHNIQUES

1 - Détermination de I_s

- Échantillonner trois fois 10 g de terre et les placer dans trois béchers de 250 cc parfaitement secs. Étaler en couche uniforme dans le fond du bécher.
- Verser doucement dans le premier bécher 10 ml d'alcool éthylique, dans le second 10 ml de benzène. Remplir le troisième avec de l'eau distillée ou échangée.
- Cinq minutes plus tard, compléter les béchers 1 et 2 avec de l'eau distillée ou échangée. Laisser reposer 25 minutes.
- Une demi-heure après le début de l'opération, vider le contenu du premier bécher dans un erlen de 750 ml par l'intermédiaire d'un entonnoir de verre de 13 cm de diamètre à tige courte. Rincer le bécher à la pissette en évitant d'envoyer le jet sur les agrégats. Toute la terre étant passée dans l'erlen, boucher après rinçage de l'entonnoir.
- Agiter en vingt retournements successifs assez énergiques de l'erlen (cette opération doit être identique avec tous les échantillons).
- Faire passer le contenu de l'erlen sur un tamis module 24 NFX 11.501 de 0,2 mm (\varnothing 10 cm), lui-même posé dans une capsule de porcelaine de 1 litre à fond plat. Bien rincer l'erlen.
- Tapoter cinq ou six fois le tamis contre le fond de la capsule pour éliminer les bulles d'air qui se sont formées sous le tamis.
- **Tamiser.** Le tamisage est l'opération la plus délicate. Le niveau d'eau dans la capsule doit se trouver à peu près à 1 cm au dessus de la toile du tamis. Imprimer au tamis, maintenu à pleine main, un mouvement de rotation alternatif dont l'amplitude sera approximativement de 120° . Dans un sens, le tamis doit monter, la toile affleurant alors la surface de l'eau, dans l'autre, il descend pour toucher finalement le fond de la capsule (la résultante est donc, en théorie, un mouvement hélicoïdal, assez vigoureux pour qu'on entende crisser le sable sur la toile du tamis). Faire vingt aller et retours de tamis. Cette opération demande une certaine adaptation pour être exécutée correctement et de façon identique sur tous les échantillons.
- Conserver le contenu de la grande capsule pour la détermination de $(A + L)$ (voir plus loin).
- Retirer le tamis, le retourner sur une capsule en porcelaine de 500 ml et, par un jet de pissette tangent à la toile, faire passer les agrégats restés sur la toile dans la capsule. Bien rincer le tamis.

- Décanter le liquide de la capsule de 500 dans la grande capsule de porcelaine.
- D'un jet de pissette, faire passer les agrégats dans une petite capsule de porcelaine de 75 mm de Ø.
- Décanter le liquide de cette petite capsule dans la grande capsule. Sécher les agrégats à l'étuve de 105°.
- Après dessiccation, laisser refroidir à l'air.
- Peser.
- Mêmes opérations sur les béchers 2 et 3.
- Les poids obtenus en grammes, multipliés par 10, donnent le % d'agrégats stables à l'eau, après prétraitement à l'alcool et après prétraitement au benzène.

Il peut être intéressant de comparer les trois chiffres obtenus pour l'eau, l'alcool et le benzène (par exemple, un chiffre nettement plus faible pour le prétraitement au benzène traduit la pauvreté en matière organique).

- Effectuer la moyenne des trois chiffres obtenus.

REMARQUE

On mènera de front les déterminations sur six prises de 10 g, (donc un échantillon en double ou deux échantillons).

La suite des opérations agitation + tamisage + récupération des agrégats demande environ quatre minutes pour chaque prise.

Détermination de (A + L) maximum

- Récupérer le contenu de la grande capsule de porcelaine, le faire passer en allonge de 1 litre. Compléter à un litre.
- Déterminer le taux (A + L) sans dispersant à la pipette de Robinson. Toutefois l'agitation doit être normalisée : commencer au temps ($t_0 - 15$ secondes), agiter par retournement lent (six à sept fois) et terminer l'agitation au temps (t_0). Prélever à 10 cm à $t_0 + 4'48''$ (à 20°).
- S'il se produit une floculation dans l'allonge, commencer l'agitation à ($t_0 - 30''$). Faire cinq à six retournements. Ajouter un dispersant (citrate ou pyrophosphate) à la dose habituelle de l'analyse mécanique. Faire un retournement et poser l'allonge au temps (t_0).
- Des trois chiffres obtenus pour (A + L) ne retenir que le plus élevé :

$$I_s = \frac{(A + L) \text{ maximum } \%}{\text{Moyenne des agrégats } \% - (0,9) \text{ S.G. } \%}$$

(S.G. = % sables grossiers donné par l'analyse mécanique normale de la terre ou mieux : par dispersion des agrégats et récupération des sables grossiers).

I_s peut varier entre 0,1 pour les terres à très bonne stabilité structurale (terres noires sur pouzzolanes de l'Ouest Cameroun par exemple) et 100 ou plus pour des terres à très mauvaise structure (terres salées d'Irak, par exemple).

2 - Détermination de la vitesse de filtration K

- Cette détermination exige l'emploi de tubes pyrex à collerette de 15 cm environ de hauteur et de \varnothing intérieur 32 mm. Ces tubes seront fermés à la base par un morceau d'étoffe maintenu par un élastique. Placer dans le fond du tube du sable grossier ou du gravier (calibre 2 à 3 mm) sur une hauteur de 2 cm exactement.
- Echantillonner 50 g de terre.
- Placer le tube, dont le fond est garni de gravier, dans un bécber de 250 ml forme haute. Mettre de l'eau dans le bécber jusqu'à environ 1,5 cm au dessus du niveau du gravier.
- Prélever dans une main métallique, environ 1/5 de la prise d'essai, soit 10 g. Laisser tomber cette terre au centre du tube aussi régulièrement que possible. Les particules tombent dans l'eau contenue dans le fond du tube et subissent ainsi un dégazage. Par deux mouvements de rotation sur place, égaliser le niveau de la terre.
- Faire monter lentement le niveau d'eau dans le tube à 2 cm environ au-dessus de la terre, au moyen d'une pissette. Opérer avec précaution et éviter dans la mesure du possible les tourbillons perturbant la colonne de terre. Amener **ensuite** le niveau d'eau du bécber à la hauteur du niveau à l'intérieur du tube. Egaliser le niveau de la terre par deux nouvelles rotations.
- Continuer le remplissage de la même façon par fraction de 10 g environ. On doit éviter la formation d'anneaux dans la colonne de terre entre chacune des additions.
- Lorsque le remplissage est terminé, ajouter de l'eau dans le tube jusqu'à 1 cm du bord supérieur. Placer le tube sur une rampe, et par l'intermédiaire d'un siphon, le relier à un cristalliseur alimenté par un flacon de Mariotte de façon à conserver un niveau constant. Régler la position du tube pour que le niveau se maintienne à 14,5 cm au dessus du bord inférieur du tube.
- Laisser l'équilibre s'établir pendant cinq à dix minutes.
- Au bout de dix minutes, commencer à recueillir l'eau qui s'écoule à la base du tube. Noter le temps. Mesurer la quantité écoulée au bout d'une heure.
- Mesurer la hauteur de la colonne de terre, en mesurant la distance "base du tube - surface de la terre" et en retranchant 2 cm (gravier au fond du tube).

$$K \text{ (cm/h)} = \frac{Q \text{ cm}^3 \text{ l cm}}{S \text{ cm}^2 \text{ h cm}}$$

- Cette détermination peut être faite sur six à dix échantillons à la fois.

Q peut varier de ϵ à 400 cm³ environ
 l est en général compris entre 4,4 et 8,5
 h = 14,5
 s = 8 cm²
 $K = \frac{Q \cdot L}{116}$
 K peut varier de ϵ à 50 cm/h.

ÉTABLISSEMENT DES PROFILS HYDRIQUES

- Utiliser une tarière, de préférence de petit diamètre (\varnothing 60 mm), graduée de 10 en 10 cm, ainsi que sa rallonge.
- Prélever les échantillons par tranches de 10 cm de profondeur. Chaque échantillon est vidé dans un plateau, rapidement homogénéisé et une partie recueillie immédiatement dans une boîte à tare de 250 cm³ (récipient de verre fermant à vis et hermétique). Une autre partie de l'échantillon est conservée en sac, et sera utilisée après séchage et tamisage pour établir les courbes de pF correspondantes.
- Peser les boîtes à tare.
- Les ouvrir et les porter à l'étuve à 105°, sans les couvercles.
- Peser après vingt-quatre heures d'étuve.
- A partir des résultats obtenus, tracer les graphiques humidité/profondeur et pF/profondeur.
- Calculer le stock d'eau total en mm par tranches de 10 cm, le stock d'eau cumulé en mm sur une profondeur déterminée, et le stock d'eau utile, par différence avec le profil de pF 4,2.

COURBES HUMIDITÉ/pF

A - PRINCIPE DE LA METHODE

Les échantillons à étudier, préalablement saturés d'eau, sont soumis à une pression déterminée. L'eau en excès est donc éliminée jusqu'à la réalisation d'un équilibre entre la force appliquée et la force de rétention de l'eau par le sol. On détermine alors la teneur en eau de l'échantillon, et on trace la courbe des teneurs en eau en fonction des pressions appliquées. La gamme des pressions étant étendue, on utilise une représentation logarithmique : le pF est le logarithme de la pression exprimée en grammes. Les valeurs les plus intéressantes du pF sont : 4,2 - 3,0, 2,5 - 2,2 et 1,9 correspondant respectivement à des pressions de 16 000, 1 000, 320, 160 et 80 g. Les extractions sont exécutées dans les presses à plaques de porcelaine poreuse, une presse à haute pression (2 à 16 kg/cm²), l'autre à basse pression (0 à 1 kg/cm²).

B - DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN EAU AUX DIFFÉRENTS pF

L'appareil utilisé comporte :

- la chambre d'extraction proprement dite,
- une plaque de porcelaine poreuse.

Les mesures sont généralement effectuées sur la terre tamisée, telle qu'elle a été préparée pour les mesures d'instabilité structurale. Elles peuvent être effectuées sur mottes ou sur des anneaux prélevés en place.

- La plaque de porcelaine est mise à tremper dans un plateau pendant une nuit. Ensuite, siphonner l'eau contenue dans le plateau. Placer les anneaux métalliques sur la plaque de porcelaine, les remplir de terre et tasser légèrement. Relever au fur et à mesure les numéros des anneaux. Faire deux répétitions par échantillon. Il est préférable de garnir toute la surface utile de la plaque (environ 50 anneaux de 30 mm de diamètre).
- Remettre de l'eau dans le plateau jusqu'à mi-hauteur des anneaux. Laisser les terres s'imbiber vingt-quatre heures.
- Mettre en place, dans la presse, la plaque de porcelaine portant les échantillons. La connecter à l'extérieur par l'intermédiaire d'un ajutage de caoutchouc.
- Effectuer le serrage des boulons.
- Établir progressivement la pression dans la chambre jusqu'à la valeur choisie.
- Arrêter l'appareil lorsque l'équilibre est établi, c'est-à-dire lorsqu'il ne se produit plus d'écoulement à l'orifice de sortie de la chambre (cet équilibre est généralement atteint en vingt-quatre heures).
- Préparer des boîtes à tare pour recueillir les échantillons. Ouvrir doucement le robinet de sortie du manomètre jusqu'à annulation de la pression à l'intérieur de la chambre. Ouvrir la chambre d'extraction.
- Mettre immédiatement les échantillons dans les boîtes à tare. Dans ce but, il est souhaitable d'opérer comme suit : les boîtes à tare étant toutes ouvertes, extraire chaque anneau de la chambre, faire glisser immédiatement la terre dans une boîte à tare, fermer cette boîte et poser l'anneau vide sur le couvercle. La perte de temps est ainsi minimum, et on dispose ensuite de tout son temps pour relever les numéros des anneaux et des boîtes correspondantes.
- Peser les boîtes à tare.

- Les ouvrir et les mettre à l'étuve à 105° (au moins quatre heures).
- Fermer les boîtes à la sortie de l'étuve et peser.
- Calculer le taux d'humidité en % de terre séchée à 105°.

REMARQUES

Pour les pressions inférieures à 320 g, la précision des manomètres peut laisser à désirer. Il est bon dans ce cas de prévoir, en dérivation sur l'arrivée de pression, un tube plongeur permettant d'obtenir une bonne précision (40 cm d'eau pour pF 1,6 - 80 cm pour pF 1,9 - 11,8 cm de Hg pour pF 2,2).

LIMITES D'ATTERBERG

(Limite de Liquidité - Limite de Plasticité)

A - DÉFINITION ET BUT DE L'ESSAI

La consistance d'un sol peut varier dans de larges limites avec :

- la quantité d'eau interstitielle que contiennent ses pores,
- l'épaisseur des couches d'eau absorbée qui enrobent ses grains.

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre :

- le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité L.L.),
- le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité L.P.).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage du poids du matériau sec.

La différence $lp = L.L. - L.P.$ qui définit l'étendue du domaine plastique est particulièrement importante, c'est l'Indice de Plasticité.

B - PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'essai s'effectue en deux phases :

- a - recherche de la Limite de Liquidité à l'aide de l'appareil de Casagrande),
- b - recherche de la Limite de Plasticité par formation de rouleaux de 3 mm de \varnothing .

C - APPAREILLAGE

1 - Appareil de Casagrande

Le matériel couramment utilisé en France se compose :

- d'un socle en bois bakélinisé monté sur quatre pieds en caoutchouc,
- d'un support métallique portant la coupelle en laiton chromé et la manivelle actionnant la came qui soulève de 10 mm la coupelle au dessus du socle. La coupelle est intérieurement soit lisse, soit rendue rugueuse par projection de nickel-chrome. La coupelle doit peser $200 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$.

2 - Outil à rainurer

Cet outil doit réaliser sur le fond de la coupelle une rainure de $2 \text{ mm} \pm 0,05$ de large, d'après A. CASAGRANDE.

3 - Accessoires

- Une cale de 10 mm pour le réglage de la hauteur de chute de la coupelle.
- Une plaque de bois ou de plexiglas, d'environ $6 \times 10 \times 2$ cm, pour confectionner les rouleaux.

4 - Divers

- Spatules, truelles et une plaque de verre pour le malaxage de l'échantillon.
- Une pissette.
- Boîtes à tare \varnothing 50 mm environ.
- Une balance de précision.
- Une étuve à 105°C .
- Un tamis de 0,40 ou 0,50 mm.

D - PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON

L'essai des Limites d'Atterberg se fait sur la fraction du matériau qui passe au tamis de 0,40 ou 0,50 mm. L'échantillonnage se fait sur matériau non séché à l'étuve, une quantité suffisante de matériau devant être tamisée pour obtenir 150 à 200 g de terre.

Le tamisage s'effectue par voie humide en remuant à l'aide d'un pinceau souple le matériau sur la toile tamisante. Le refus devra être parfaitement propre. L'essorage de l'échantillon peut être réalisé sur plaque poreuse, dans les appareils de mesure de pF.

E - EXÉCUTION DES ESSAIS

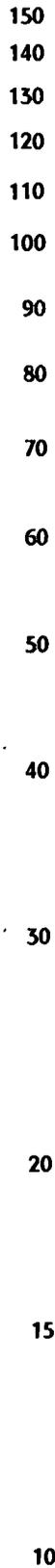
1 - Limite de Liquidité (LL)

Le réglage de la hauteur de chute de la coupelle se fait à l'aide d'une cale en déplaçant la plaque coulissante de l'appareil de Casagrande de telle sorte que la chute de la coupelle soit exactement de 10 mm.

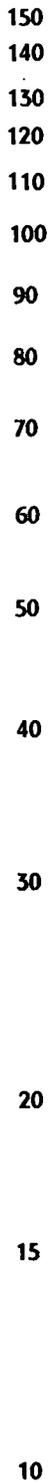
On s'efforce de recueillir l'échantillon à une teneur en eau élevée pour pouvoir débiter l'essai de limite de liquidité. Si le matériau est humide, mais trop consistant, on peut rajouter de

NOMOGRAMME W.E.S.

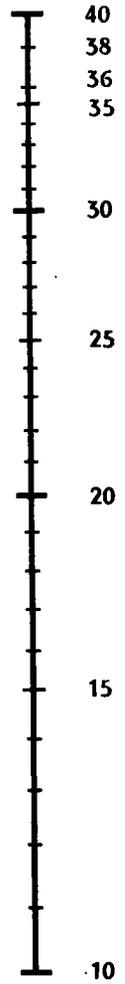
Humidité
W



W_L



Nombre de coups : N



l'eau. Si le matériau est sec, il faut le laisser imbiber pendant douze heures au minimum.

Pour obtenir une pâte bien homogène et presque fluide, on malaxe vigoureusement la totalité de l'échantillon à l'aide de la truelle, et, sur la plaque de verre. L'étalement de l'échantillon doit être fait à plusieurs reprises sur cette plaque.

On place alors environ 70 g de pâte répartie avec la spatule en plusieurs couches, de façon à former un gâteau à peu près symétrique par rapport au plan de symétrie de la coupelle. L'épaisseur du matériau au centre de la coupelle doit être de l'ordre de 15 à 20 mm.

A l'aide de l'outil à rainurer, tenu perpendiculairement à la surface de la coupelle, la partie biseautée de l'outil vers l'avant de l'appareil, on partage la pâte en deux.

La coupelle fixée sur l'appareil est ensuite soumise, à l'aide de la manivelle, à une série de chocs réguliers : deux coups par seconde. On note le nombre de chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur de 1 cm appréciée à l'œil. Le nombre de coups de fermeture doit être compris entre 15 et 35. On prélève alors (à l'aide de la spatule) deux échantillons de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées. On place les échantillons dans des boîtes à tare qu'on pèse immédiatement, puis on les porte à l'étuve jusqu'à dessiccation complète.

On recommence la même opération deux ou trois fois après avoir réétalé l'échantillon, et donc à des teneurs en eau de plus en plus faibles.

Le nombre de chocs devra augmenter de 5 unités au moins par rapport au premier essai, mais tout en demeurant inférieur à 35.

Remarque

La fermeture de la rainure doit se produire par affaissement du matériau dans sa masse (cisaillement) et non par glissement sur la paroi de la coupelle. La coupelle rugueuse a pour but d'éviter ce glissement et doit être employée quand on ne réussit pas à obtenir la fermeture autrement, par exemple pour les mortiers sableux.

Entre chaque essai, il faut nettoyer la coupelle. La coupelle rugueuse doit être lavée essentiellement à l'éponge et à l'eau. L'utilisation d'une spatule, truelle, etc., ne doit absolument pas être autorisée.

DÉTERMINATION DE LL

Par définition : la Limite de Liquidité est la teneur en eau du matériel qui correspond à une fermeture sur un cm des lèvres de la rainure après 25 chocs.

Comme il est difficile d'obtenir la fermeture à 25 coups, il existe une relation permettant de trouver L.L. à partir d'un seul essai, pourvu que le nombre de coups de fermeture soit compris entre 15 et 35.

Cette relation s'écrit :

$$L.L. = W \frac{(N)^{0,121}}{(25)}$$

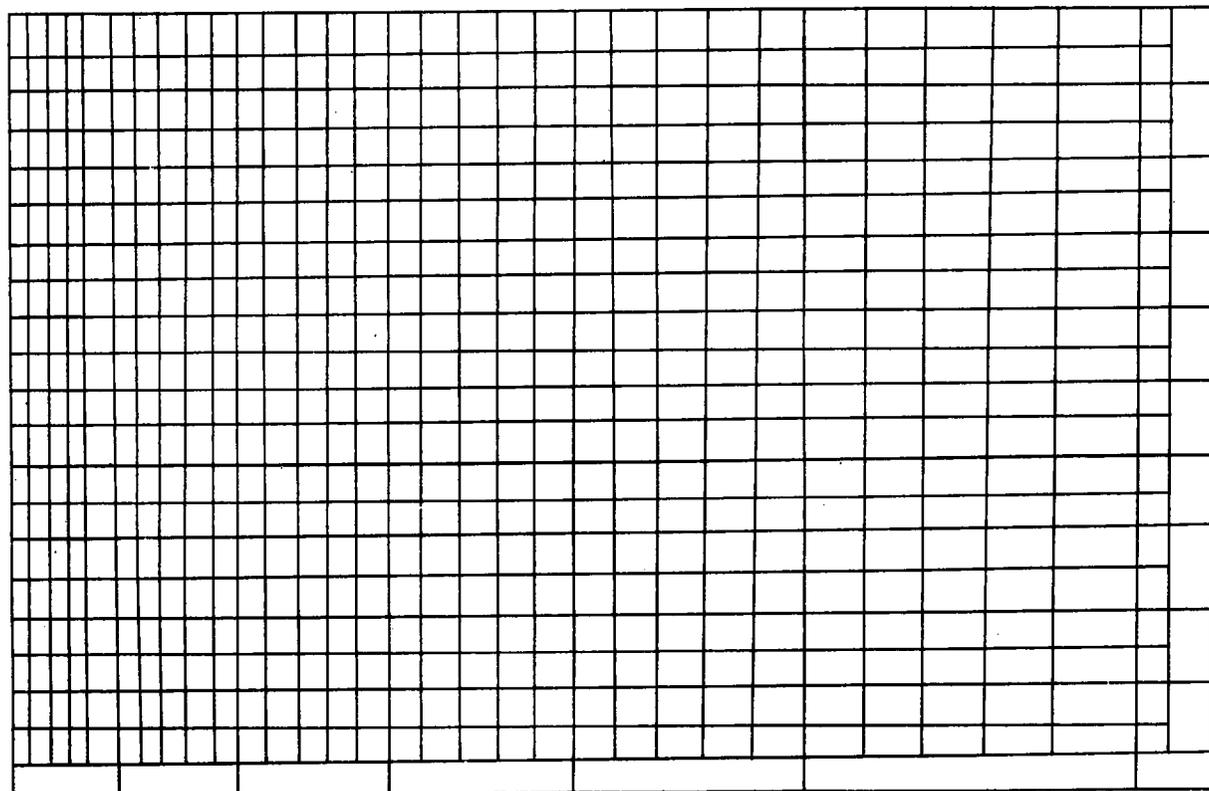
où L.L. est la limite de liquidité.

W la teneur en eau du sol au moment de l'essai,

N le nombre de coups correspondant à la fermeture de l'échantillon sur 1 cm dans la coupelle.

Pour faciliter son emploi, cette relation a été traduite en nomogramme (abaque W.E.S.).

Pour chacun des essais de Limite de Liquidité, on calcule la moyenne des teneurs en eau qui permettent, à l'aide du nomogramme, de déterminer L.L.



40

35

30

25

20

15

10

NOMBRE DE COUPS

TENEUR EN EAU (%)

Un autre type de représentation graphique est le suivant : sur un papier semi-logarithmique, on représente les teneurs en eau obtenues à chaque essai en fonction du nombre de chocs correspondants. Les trois ou quatre points obtenus sont normalement alignés. La droite qui les relie permet d'estimer le taux d'humidité correspondant à une fermeture de 25 chocs.

4 - Limite de Plasticité (L.P.)

La limite de plasticité se faisant après la limite de liquidité, on a souvent un échantillon trop humide qu'on dessèche en le malaxant et en l'étalant sur la plaque de verre. On peut accélérer le séchage au moyen d'un ventilateur en malaxant constamment afin d'éviter la formation d'une pellicule sèche.

On forme une boulette de l'échantillon et, à l'aide d'une plaque ou à la main, on roule l'échantillon sur la plaque de façon à former un rouleau qu'on amincit progressivement jusqu'à ce qu'il ait atteint 3 mm de diamètre.

Cette opération doit être menée avec les précautions suivantes :

- une cadence du mouvement de la main de 60 à 80 allers-retours par minute est recommandée ;
- l'amincissement du rouleau doit se faire en une seule fois ; en particulier celui-ci ne doit jamais être aminci en le coupant, à l'aide de la spatule, dans le sens de la longueur ;
- le rouleau arrivé à 3 mm de diamètre doit avoir 10 à 15 cm de longueur et ne doit pas être creux ;
- la limite de plasticité est atteinte lorsqu'en soulevant de 1 à 2 cm le rouleau de 3 mm en son milieu il se fissure ;
- si le matériau contient trop d'eau, on reforme une boulette qu'on malaxe pour la sécher et on recommence l'opération jusqu'à ce que la Limite de Plasticité soit atteinte ;
- on prend alors le rouleau qu'on place dans une boîte à tare à couvercle étanche ou dans un verre de montre ;
- on effectue un deuxième essai à partir d'une autre boulette du même échantillon ; après rupture, on place le second rouleau dans une autre boîte à tare ;
- on pèse les deux boîtes à tare.

Par définition : la Limite de Plasticité d'un échantillon est la teneur en eau exprimée en % du poids du matériau sec du rouleau qui se brise au moment où son diamètre atteint 3 mm.

ABAQUE 2
(P% - P₁ - P₂ -)

