PN-AAH-866
FR ED:
ENG ED: PN-AAH-866

MANUEL

pour le prelevement et les essais

DES LATERITES, DES SOLS LATERITIQUES

et d'autres sols difficiles

D'AFRIQUE

Préparé pour

L'AGENCE POUR LE DEVELOPPEMENT INTERNATIONAL

AID/csd—2164

Septembre, 1971

LYON ASSOCIATES, INC.

Baltimore, Maryland, U.S.A.

BUILDING & ROAD RESEARCH INSTITUTE

Kumasi, Ghana

PN-AAE-116

MANUEL

pour le prélevement et les essais

DES LATÉRITES, DES SOLS LATERITIQUES

et d'autres sols difficiles

D'AFRIQUE

Préparé pour

L'AGENCE POUR LE DEVELOPPEMENT INTERNATIONAL

AID/csd—2164

Septembre, 1971

LYON ASSOCIATES, INC.

Baltimore, Maryland, U.S.A.

BUILDING & ROAD RESEARCH INSTITUTE

Kumasi, Ghana

REMERCIEMENTS

Beaucoup d'éléments de ce manuel on été empruntés à un manuel de l'Armé préparé pour le Ministère de la Guerre Américain (TB 5-253-1 ; 1945) par l'Université de Harward sous la direction de A. Casagrande et de S. Wilson. Ce manuel fut légèrement révisé en 1950 par G.E. Betram et imprimé sous le titre de "SOIL TESTS" (Essais sur les sols) comme Technical Bulletin N° 107 par l'American Road Builders Association. Il fut encore révisé en 1960 par W.C. Labaugh, Jr. lorsqu'une édition espagnole en fut préparée et de nouveau en 1964. Il est encore disponible chez l'ARBA comme Technical Bulletin N° 107 (révisé), 1964. L'ARBA a eu l'amabilité de nous permettre d'utiliser cette dernière version.

La section portant sur la terminologie des sols fut prise du "SOIL PRIMER" (Première Introduction aux Sols) de la Portland Cement Association. Nous remercions ici très sincèrement la PCA pour nous avoir autorisés à inclure cette section dans ce manuel. Cette Première Introduction aux Sols est un excellent livret sur les fondements de la géotechnique.

Les dessins artistiques ont été repris par Emmanuel Y. Cwusu Brempong de l'Université des Sciences et de la Technologie de Kumasi au Ghana. La plupart de ces nouvelles figures furent dessinées à partir de celles du Bulletin N° 107.

TABLE DES MATIERES

REMIERCEMENTS iii

INTRODUCTION vii

TERMINOLOGIE ET PROPRIETES D'IDENTIFICATION DES SOLS 1

SOLS TROPICAUX ALTERES 4

IDENTIFICATION DES SOLS SUR LE TERRAIN 9

ESSAIS D'IDENTIFICATION SUR LE TERRAIN 10

INSTALLATION D'UN LABORATOIRE 12

APPAREILS 13

RECONNAISSANCE DES SOLS ET PREVELEMENT DES ECHANTILLONS 16

MODALITES DE PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS EN VRAC 19

QUARTAGE DES ECHANTILLONS 20

PROCESSUS DES ESSAIS 23

- PESEE DES MATERIAUX 24
- ESSAI DE TENEUR EN EAU 27
- ESSAI DE PLASTICITE 28
- ESSAI DE LIMITE DE LIQUIDITE 30
- ESSAI DE LIMITE DE PLASTICITE 32
- INDICE DE PLASTICITE 32
- ANALYSE GRANULOMETRIQUE 34
- DETERMINATION DU POIDS SPECIFIQUE APPARENT 40
- DETERMINATION DE LA DENSITE REELLE 41
- ESSAI DE COMPACTAGE POUR LA DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU OPTIMUM ET LA DENSITE SECHE MAXIMUM 43
- ESSAI DE L'INDICE PORTANT DE CALIFORNIE 47

STABILISATION 55

INDEX 56

INTRODUCTION

Les essais sur les sols sont une partie importante et intégrale du dimensionnement et de la construction des routes. Une connaissance approfondie des sols sur lesquels passe le tracé d'une route, est absolument indispensable au dimensionnement approprié des couches de la chaussée. Cette connaissance s'acquiert invariablement par des investigations sur le terrain et des études de laboratoire. Il est également nécessaire de vérifier pendant la construction que le projet est respecté. La densité, ou le degré de compactage, est suivie par des essais de chantier standards et relativement simples. La qualité des matériaux d'apport est vérifiée périodiquement par des essais simples portant sur les propriétés caractéristiques.

La plupart des essais des sols décrits dans ce manuel sont relativement simples et peuvent être maîtrisés avec une expérience de quelques jours. Comme pour tous les essais de laboratoire, la précision et la reproductibilité sont importantes. Tous les essais doivent être faits avec soin et toutes les mesures ainsi que les calculs doivent être vérifiés. Avec l'expérience, on peut arriver à dégager un enchaînement méthodique des essais adapté à la charge de travail dont la suite bien établie permet de compléter une variété d'essais avec précision chaque jour.

Des laboratoires de chantier sont nécessaires pendant la construction et pour les études d'avant-projet lorsque les laboratoires centraux sont trop loin pour être utilisés commodément. De petits laboratoires régionaux ont été montés dans beaucoup de pays pour fournir des renseignements sur les sols utilisés dans des routes projetées localement, ainsi que pour faire les essais indispensables au contrôle de la construction. Des laboratoires mobiles, souvent abrités dans des caravanes, ont de plus en plus la faveur des techniciens pour le contrôle de la construction et plus particulièrement dans les régions reculées.

Presque tous les essais nécessaires au dimensionnement des ouvrages et au contrôle de la construction peuvent être effectués dans de tels laboratoires. Les essais plus complexes, comme ceux utilisés pour la détermination de certaines propriétés géotechniques, ne devraient être effectués que dans les laboratoires centraux spécialement équipés.

Le but de ce manuel est de donner les détails de base sur : (1) l'identification des divers sols, (2) les appareillages de laboratoire nécessaires aux essais, (3) les techniques d'exploration et de prélèvement des sols et (4) les processus des essais de laboratoire. La présentation est simple et directe et comporte de nombreuses illustrations. Ceci devrait faciliter l'utilisation du manuel sur le chantier par des ingénieurs et des techniciens inexpérimentés.

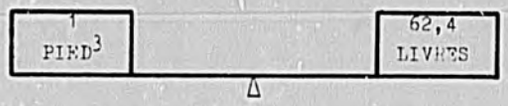
Le manuel comprend une introduction aux sols tropicaux qui est extraite du rapport final intitulé "Les latérites, les sols latéritiques et d'autres sols difficiles d'Afrique" préparé pour l'Agence Américaine pour le Développement International par Lyon Associates et le BRRI. Les brèves descriptions de ces sols ont pour but de donner quelques connaissances de base sur leurs propriétés générales et leur répartition, ainsi que sur les traitements spéciaux exigés par certains sols tropicaux altérés. Les processus détaillés des essais à employer sont également considérés dans les sections.

L'identification des sols en place est un aspect important du travail sur le terrain. Les processus usuels utilisés pour déterminer les types généraux des sols sont décrits dans une section spéciale. Les méthodes de prélèvement d'échantillons intacts ou remaniés sur le terrain sont également décrits.

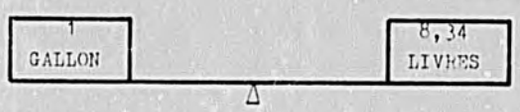
Tous les essais courants de laboratoire sont entièrement décrits et des modèles de feuilles d'essai sont montrés. Une liste des appareils recommandés pour un laboratoire de chantier est également donnée.

FACTEURS DE CONVERSION

Dans les essais des sols, il est souvent nécessaire de convertir des grandeurs exprimées en unités du système métrique en unités du système britannique.



1 PIED CUBE D'EAU PESE 62,4 LIVRES



1 GALLON D'EAU PESE 8,34 LIVRES

MULTIPLIER	PAR	POUR OBTENIR
CENTIMETRES	10	MILLIMETRES
CENTIMETRES	0,3937	POUCES
CENTIMETRES	0,0328	PIEDS
CENTIMETRES CARRES	0,1550	POUCES CARRES
CENTIMETRES CUBES	0,06102	POUCES CUBES
GALLONS	0,1336	PIEDS CUBES
GRAMMES	0,001	KILOGRAMMES
GRAMMES	0,0022	LIVRES
KILOGRAMMES	2,205	LIVRES
KILOGRAMMES	1 000	GRAMMES
KILOGRAMMES PAR CENTIMETRE CARRE	1,024	TONNES PAR PIED CARRE
LIVRES	453,6	GRAMMES
LIVRES	0,4536	KILOGRAMMES
LIVRES PAR POUCE CARRE	0,072	TONNES PAR PIED CARRE
MILLIMETRES	0,1	CENTIMETRES
MILLIMETRES	0,03937	POUCES
PIEDS	30,48	CENTIMETRES
PIEDS CUBES	28.320	CENTIMETRES CUBES
PIEDS CUBES	1.728	POUCES CUBES
PIEDS CUBES	7,48	GALLONS
POUCES	2,540	CENTIMETRES
POUCES	25,40	MILLIMETRES
POUCES CARRES	6,452	CENTIMETRES CARRES
POUCES CUBES	16,39	CENTIMETRES CUBES
POUCES CUBES	0,0005787	PIEDS CUBES
QUARTS	946,3	CENTIMETRES CUBES
QUARTS	57,75	POUCES CUBES

TERMINOLOGIE ET PROPRIETES D'IDENTIFICATION DES SOLS

Chaque terme utilisé dans les travaux sur les sols a une signification et une application précises. Chaque essai de sol a également une signification et une application précises et révèle certaines propriétés d'un sol. Une utilisation correcte de la terminologie contribuera beaucoup à éviter des confusions et des incompréhensions.

SOLS

Des définitions scientifiques ont été données aux sols par les ingénieurs agronomes, les géologues et d'autres experts intéressés aux sols. L'ingénieur routier, cependant, peut considérer comme sol, tout matériau en terre qu'il rencontre dans son travail à l'exception des roches et des schistes argileux en place. Pour lui les sols vont, par suite, des argiles aux graviers glaciaires et aux éboulis de pente.

Les propriétés d'un sol varieront en fonction de sa granulométrie, de sa teneur en eau, de sa position verticale par rapport à la surface et de son lieu géographique.

La plupart des sols ont à l'origine été des roches solides. Le temps et le climat ont brisé la roche en morceaux de plus en plus petits. Ceci peut être montré au laboratoire en prenant deux à trois morceaux de gravier ou de roche calcaire, par exemple, et en les pulvérisant. Il se forme des grains de la grosseur d'un sable d'abord, et de celle d'un limon ensuite et finalement des particules de la dimension des argiles. Mais au fur et à mesure que la nature réduit les roches en grains de plus en plus fins, il se produit également des altérations chimiques ; par suite l'argile produite par la nature au cours de nombreuses années diffère du matériau de même finesse mais produit en peu de temps au laboratoire.

DIMENSIONS DES GRAINS DE SOL

L'ingénieur routier a donné des noms aux grains de sol de diverses dimensions et il a fixé des limites bien définies aux dimensions de chaque catégorie. Par ces noms et ces dimensions donnés aux grains de sol, tous les essais de sol sont placés sur une base commune qui facilite les comparaisons. La proportion de chaque catégorie de grains contenus dans un sol est un des outils majeurs utilisé pour juger, analyser et classer un sol. Notons, cependant, qu'il y a de légères différences dans la manière dont les divers services définissent les catégories de grains.

La proportion de chaque catégorie de grains dans un sol est déterminée par des essais de laboratoire généralement appelés analyse granulométriques. Les fractions de gravier et de sable sont déterminées par tamisage ; les fractions de limon, d'argile et de colloïde sont déterminées par sédimentométrie. La répartition du pourcentage des grains d'un sol suivant leur dimension est appelée la granulométrie du sol. Les méthodes normalisées, prescrites par l'American Association of State Highway Officials[+] et l'American Society for Testing and Materials[++], qui comprennent l'essai de sédimentométrie pour la fraction de sol passant le tamis N° 200, ont été très largement utilisées dans la construction routière. La méthode d'analyse granulométrique utilisée par le Département Américain de l'Agriculture[+++] sert de base au système de classification pédologique.

TEXTURE DES SOLS

La proportion de chaque catégorie de grains, contenus dans le mélange que constitue un sol, détermine sa texture ou son toucher. Les termes relatifs à la texture, utilisés pour diverses proportions des grains de chaque catégorie, sont définis par plusieurs services. La proportion de chaque catégorie de grains d'un sol est déterminée par des essais de laboratoire. Ces résultats d'essai sont alors comparés avec les définitions de la texture sur lesquelles est basé leur nom.

Avec l'expérience acquise en effectuant des essais et en classant la texture de sols d'après leur granulométrie, il est possible de faire des approximations sur la texture au simple toucher d'un sol humide frotté et roulé entre le pouce et l'index.

La texture d'un sol est donnée pour en dire le plus possible en quelques mots. Une fois la texture donnée, des approximations et des estimations de nombreuses propriétés d'un sol peuvent être faites, telles que la portance, la capacité de rétention d'eau, le danger de soulèvement dû au gel, l'adaptation ou non du sol à la construction en sol-ciment, etc..

Beaucoup de raccourcis pratiques peuvent être trouvés pour déterminer la proportion de limon et d'argile dans un sol et pour arriver à le classer approximativement suivant sa texture. Cependant, comme les gammes de teneur en argile des groupes texturels ne sont pas larges, il faut peser les échantillons avec précision ce qui exige quelques appareils de laboratoire.

COULEURS DES SOLS

La couleur d'un sol varie avec sa teneur en eau. Il est de pratique courante de déterminer la couleur d'un sol dans son état humide, mais lorsqu'on procède ainsi, il faut toujours noter le degré d'humidité. La couleur de sols bigarrés doit être déterminée lorsqu'ils sont à leur teneur en eau naturelle, parce que des manipulations mélangeront et feront disparaître les couleurs particulières. Les couleurs apparentes d'un sol humide ou sec constituent un des moyens utilisés pour localiser différents sols et pour déterminer les limites de chaque horizon (couche). Les différents horizons forment ce qu'on appelle un "profil de sol".

[+] AASHO T88

[++] ASTM D422

[+++] Victor J. Kilmer et Lyle T. Alexander, "Methods of Making Mechanical Analyses of Soils", Soil Science, Vol. 68, juillet à décembre 1949, pages 15 - 24

La couleur indique que certains composés peuvent être présents. Une couleur noire à brun sombre indique la présence de matières organiques. Une couleur rouge indique la présence d'oxydes de fer. Une couleur de sol jaune à jaune brunâtre indique la présence de fer, parfois hydraté, et que ces sols sont mal drainés, car autrement le fer serait sous une forme chimique différente et donc d'une couleur différente, peut-être plus rouge. Un bleu grisâtre et des couleurs bigarrées grises et jaunes indiquent également un drainage médiocre. Une couleur blanche indique la présence d'une proportion considérable de silice ou de chaux, ou dans quelques cas de composés alumineux.

STRUCTURE DES SOLS

Un sol humide ou sec dans son état naturel à tendance à tomber en morceaux d'une forme plutôt bien définie, ressemblant à une figure géométrique ou à un autre matériau. Un sol peut avoir ainsi une structure prismatique, monolithique, granuleuse, émiettée ou farineuse. La structure est une indication des caractéristiques du drainage et est un des moyens utilisés pour localiser divers sols et pour déterminer les limites des horizons. La structure d'un sol ne doit pas être confondue avec les caractéristiques structurelles (résistance d'un sol).

PROFIL DU SOL

La coupe verticale à travers les couches de sol constitue ce qu'on appelle un profil. Un profil est composé de trois couches principales désignées comme horizons A, B et C. Les horizons A et B sont les couches qui ont été modifiées par l'altération, tandis que l'horizon C n'a pas été touché par les processus de formation du sol. (L'horizon D sous les trois couches précédentes est le matériau sous-jacent dans la condition originelle de la formation).

Horizon A : c'est la couche superficielle du sol, de couleur et de texture uniformes sur toute l'épaisseur, qui, en général, est de 10 à 12 pouces mais qui peut varier de 2 pouces à 2 pieds. L'enlèvement de la couverture native d'arbres par par des opérations de déboisement ou d'herbes par l'exploitation agricole peut se traduire par une érosion qui enlève cette couche de sol superficielle ainsi que les couches sous-jacentes. On désigne également l'horizon A par sol superficiel lorsque l'érosion ne s'est pas produite.

Horizon B : c'est la couche de sol juste au-dessous de l'horizon A, couche dont la couleur et la texture sont également uniformes sur toute son épaisseur. Cette épaisseur est en général de 10 à 12 pouces, mais elle peut varier de 4 pouces à 8 pieds. Dans les régions de climat humide ou semi-humide, l'horizon B est la zone d'accumulation ce qui veut dire que les éléments colloïdaux portés en suspension à partir des horizons sus-jacents sont venus s'y loger. On désigne également l'horizon B comme sous-sol.

Horizon C : c'est la couche de sol juste au-dessous de l'horizon B. Cette couche a aussi une couleur et une texture uniformes à travers toute son épaisseur. Cet horizon est très différent de l'horizon B. Son épaisseur peut être pratiquement infinie et descendre bien en-dessous du niveau qui intéresse l'ingénieur routier. Au commencement du développement du profil, l'horizon C constituait toute l'épaisseur, mais le temps, le climat et les processus de formation du sol ont transformé les couches supérieures en des horizons A et B (décrits ci-dessus). L'horizon C (sol-mère) peut être de l'argile, du limon, du sable, une combinaison de ceux-ci ou de la roche.

On désigne également l'horizon C comme roche-mère ou matériau de départ du sol.

Horizon D : c'est la couche de roche solide, de gravier, de sable ou d'argile qui se trouve sous l'horizon C. Il est d'une profondeur indéterminée et dans la condition de sa formation originelle.

L'EAU DU SOL

Teneur en eau : la quantité d'eau dans un sol est toujours donnée en pourcentage par rapport au poids du sol séché à l'étuve. Le pourcentage d'eau est déterminé en pesant le sol humide, en le séchant à l'étuve à 110° C (230° F) jusqu'à poids constant et en le pesant de nouveau. La différence des poids donne la perte d'eau. Ce chiffre divisé par le poids du sol étuvé donne le pourcentage d'eau. Cette façon de définir la teneur en eau ne s'applique pas seulement à la proportion d'eau dans le sol mais également à tous les autres essais de teneur en eau tels que la limite de liquidité, la limite de retrait, la limite de plasticité, la teneur en eau optimum, etc. décrits plus loin.

Le mécanicien des sols distingue trois types d'eau dans ses travaux. Le type et la quantité d'eau qui se trouvent dans un sol ont une grande influence sur son comportement et sur sa valeur en tant que terrain de fondation.

Eau gravitaire : eau libre de s'écouler vers le bas sous l'effet de la pesanteur. C'est l'eau qui se draine d'un sol.

Eau capillaire : eau retenue dans un sol par les capillaires (pores). C'est de l'eau libre, mais elle ne peut être enlevée du sol que lorsque la nappe phréatique a baissé et lorsque l'évaporation est plus rapide que la vitesse de l'écoulement capillaire.

Remarque : les eaux gravitaire et capillaire sont considérées et désignées comme eau libre.

Eau solidifiée : c'est l'eau retenue par le sol lorsque l'eau gravitaire et capillaire a été enlevée. Elle est retenue par chaque grain de sol sous la forme d'un film très fin et elle a une affinité à la fois physique et chimique avec le grain de sol. On la désigne également comme teneur en eau après séchage à l'air. Ce film est en équilibre avec l'humidité de l'air et il croît ou décroît avec elle. L'eau solidifiée d'un sol varie également avec la dimension des grains ; elle croît lorsque la dimension des grains décroît.

PROFIL DE SOL HYPOTHETIQUE AYANT TOUS LES HORIZONS

	Débris organiques reposants sur le sol ; d'ordinaire absents sur des sols développés par des herbes	A_o	Débris organiques
		A_1	Horizon sombre contenant une proportion relativement élevée de matières organiques mélangées avec des matières minérales. Epais dans les chernozem et très mince dans les podzols.
	Zone d'éluviation	A_2	Horizon de couleur claire. Région de lessivage (ou de réduction) maximum où il y a podzolisation* ou solodisation**. La bleicherde du podzol. Absent dans les chernozems , les browns, les sierozems et quelques autres sols.
Le Solum. (cette partie comprend le vrai sol développé par des processus de formation du sol)		A_3	Transition à B mais ressemblant plus à A qu'à B. Parfois absent.
		B_1	Transition à B mais ressemblant plus à B qu'à A. Parfois absent.
	Zone d'illuviation. (Sans carbonate ou sulfate comme dans les sols de chernozem, de brown et de sierozem. Dans de tels sols cet horizon doit être considéré comme étant essentiellement une transition entre A et C).	B_2	Horizon de couleur (d'habitude) plus sombre. Région d'illuviation maximum où il y a podzolisation ou solodisation. L'orstein du podzol et le claypan du solonetz solodisé. Dans les sols de chernozem, de brown et de sierozem cette région a un caractère structurel bien défini, souvent prismatique, mais n'a pas beaucoup de matériaux illuviaux ; c'est une transition entre A et C. Souvent absent à l'intérieur des sols des régions humides.
		B_3	Transition à C
	Roche mère	C	Roche mère
	Toute couche au-dessous de la roche mère comme de la roche dure ou une couche d'argile ou de sable qui n'est pas la roche mère, mais qui a un rapport avec le sol sus-jacent.	D	Couche sous-jacente.

* Processus du lessivage descendant de l'eau à travers les horizons A et B

**Processus d'accumulation des minéraux superficiels par lessivage ascendant produit par l'évaporation dans des régions de faible pluviosité qui produit des mouvements d'eau vers la surface.

SOLS TROPICAUX ALTERES

INTRODUCTION

Le comportement géotechnique des sols, qu'ils soient formés dans des conditions arctiques, tempérées ou tropicales, est déterminé par certaines caractéristiques physiques que l'on appelle propriétés géotechniques. Une fois que l'ingénieur a déterminé quelles sont les propriétés importantes en fonction du type particulier de construction et d'un site donné, il peut, au moins en principe, effectuer un certain nombre d'essais appropriés pour évaluer les propriétés quantitativement et il peut baser son projet sur les résultats de ces essais. Cette procédure fondamentale est à la base de tout dimensionnement géotechnique rationnel.

En pratique cependant, cette procédure fondamentale apparamment simple peut rarement être utilisée sans modifications. Comme la détermination des propriétés géotechniques est généralement chère, les propriétés caractéristiques dont l'évaluation est plus simple et meilleure marché, mais qui ne sont qu'une indication des caractéristiques géotechniques, sont étudiées. En se basant sur ces études, on classe les matériaux dans un certain nombre de catégories différentes en fonction de leur comportement. On peut alors organiser l'expérience et on peut l'utiliser comme base pour le dimensionnement dans de nouveaux sites ou pour de nouveaux projets associés à des sols dont la classification est analogue.

Les conséquences de l'altération tropicale ont été d'une importance primordiale dans la formation des sols de l'Afrique équatoriale. Aucun système de classification ou tentative d'identification des caractéristiques géotechniques significatives ne peut, par suite, être couronné de succès, s'il n'est basé sur la compréhension des processus d'altération tropicaux. Ces processus ont été l'objet de très nombreuses recherches et sont décrits dans une littérature d'une abondance impressionnante.

L'ALTERATION[+]

Les roches exposées à ou près de la surface de la terre se trouvent dans un environnement physique et chimique souvent très différent de celui dans lequel elles ont été formées originellement. Les minéraux qui constituent les roches peuvent réagir chimiquement avec l'eau de pluie, l'eau souterraine et avec des solides ou des gaz dissouts provenant du milieu superficiel pour former de nouveaux minéraux qui sont dans un équilibre plus stable avec les conditions règnant à la surface. Quelques matériaux peuvent être dissouts et emportés par les eaux souterraines. Le résultat final de ces changements est de transformer la partie supérieure des roches en en débris résiduels dont le caractère est plutôt celui d'un sol que celui d'une roche et dont les propriétés chimiques, minéralogiques et physiques sont entièrement différentes de celles de la roche originelle.

Les changements qui ont lieu dans la roche par suite de ces processus superficiels, sont tous embrassés par le terme géologique d'altération. Une forme de l'altération, qualifiée de physique, comprend les effets de processus mécaniques tels que l'abrasion, l'expansion et la contraction. Les produits résultant de l'altération physique consistent de blocs anguleux, de pierres, de graviers, de sable, de limon et même d'une farine de roche aussi fine que les argiles. Les constituants minéraux de tous ces produits résultants sont exactement les mêmes que ceux des roches de départ. L'altération chimique produit, par contre, la décomposition de la roche et la formation de minéraux nouveaux. Les agents de l'altération superficielle, qui entrent en réaction chimique avec les minéraux primaires de la roche, comprennent l'eau, l'oxygène, le gaz carbonique et les acides organiques provenant de la végétation. Les divers processus chimiques comprennent l'hydratation, l'hydrolyse, la dissolution et la carbonation. Ils peuvent tous agir simultanément, mais parmi eux certains peuvent opérer plus rapidement et certains plus efficacement que d'autres sur l'altération d'une sorte de minéraux que sur une autre.

Les changements chimiques, qui s'opèrent dans les minéraux primaires de roches dans les zones tempérées ou semi-tropicales, ont tendance à donner naissance à des produits de transformation composés de minéraux argileux où prédomine la kaolinite, occasionnellement l'halloysite, et les oxydes hydratés ou anhydres de fer et d'aluminium. Le quartz se dissout légèrement, mais reste essentiellement inchangé ; il peut cependant être fragmenté mécaniquement.

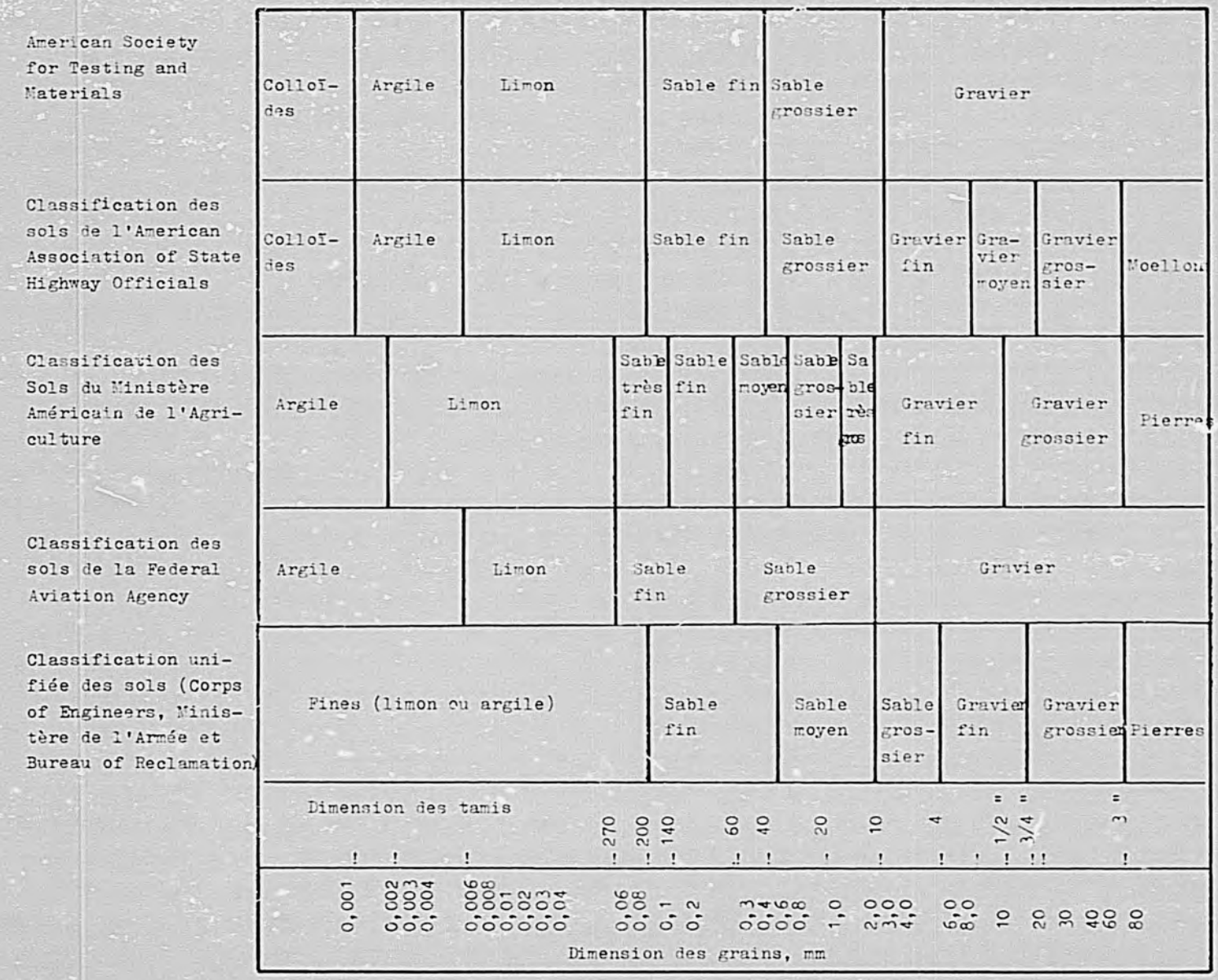
L'altération chimique est favorisée par un climat chaud et humide, par la présence de végétation et de pentes douces. Ainsi, les régions tropicales et subtropicales d'un relief bas, recevant des pluies abondantes et où les températures sont élevées, sont les plus favorables à l'altération chimique. Les profils profonds, fortement lessivés, rouges, bruns ou jaunes sont la manifestation des effets d'une altération chimique sévère.

Dans des conditions favorables à l'altération tropicale, le processus d'altération peut être tellement intense et peut être poussé si loin, que, même des minéraux argileux qui sont essentiellement des hydrosilicates d'aluminium, peuvent être détruits ; au cours de l'altération qui se poursuit la silice est lessivée et le restant se compose simplement d'oxydes aluminium, tels que la gibbsite, ou d'hydroxydes de fer, tels

---

[+] Cette section est en grande partie empruntée à la thèse de P. Jiminez-Quinones, "Les caractéristiques de compactage des sols tropicaux altérés" (Ph. D. Thesis, University of Illinois, 1963), et à des conférences du professeur Don. U Deere, faisant partie de son cours à l'Université d'Illinois, ainsi qu'à des conférences qu'il a faites à l'Université de Harvard en 1968.

LIMITES DES DIMENSIONS DES CLASSES GRANULOMETRIQUES



que la limonite ou la geothite dérivées du fer. Ce processus est connu sous le nom de latéritisation.

Le degré d'avancement de la latéritisation d'un sol peut être mesuré par le rapport de la silice, SiO_2, restant dans le sol (excepté pour des galets de quartz libres qui peuvent rester intacts) aux quantités de Fe_2O_3 et d'Al_2O_3 qui se sont accumulées. Le rapport silice/sesquioxydes

$$\frac{SiO_2}{R_2O_3} = \frac{SiO_2}{Fe_2O_3 + Al_2O_3}$$

a servi de base à la classification des sols résiduels. Des rapports inférieurs à 1,33 ont parfois été considérés comme indicatifs des latérites véritables, ceux compris entre 1,33 et 2,00 comme indicatifs des sols latéritiques et ceux supérieurs à 2,00 comme indicatifs de sols tropicaux altérés non latéritiques.

Même la détermination du rapport relativement simple silice/sesquioxydes exige une analyse chimique dont l'ingénieur de génie civil ne pourra probablement pas disposer. De plus, l'expérience a montré que ce rapport n'est en aucune manière un indicateur unique des propriétés caractéristiques et géotechniques dont l'ingénieur a besoin. Beaucoup d'autres facteurs sont d'une importance plus grande.

PROFILS D'ALTERATION

La transformation des roches par les processus de l'altération chimiques se produit progressivement par une série d'évènements et d'étapes, dont le résultat est un profil d'altération. Ceux qui ont travaillé avec des sols tropicaux altérés résiduels, ont noté qu'on trouve fréquemment une zone supérieure argileuse d'une épaisseur de quelques pieds, qui recouvre une zone limoneuse ou sableuse, qui elle-même passe par une transition très irrégulière à du rocher altéré et finalement à la roche saine. L'épaisseur de chaque partie du profil varie beaucoup de site en site à cause de la complexité des influences réciproques des facteurs qui contrôlent la formation du sol, comme la pluviosité, la température, le temps, le caractère de la roche mère, la topographie et la végétation. De plus, à un endroit donné, il peut y avoir de grandes différences dans la profondeur et l'épaisseur de la roche altérée sur des distances latérales de quelques pieds seulement. Ces variations sont dues à des différences dans la lithologie, comme la présence d'un filon ou d'un contact, ou de différences dans le degré de fissuration ou de l'ampleur du cisaillement. Ces dernières caractéristiques augmentent la perméabilité et la profondeur à laquelle l'altération peut se poursuivre.

Des profils d'altération semblables se développent dans des conditions également semblables, reflétées par les facteurs de formation du sol mentionnés ci-dessus. Un moyen commode pour la description régionale des propriétés des sols, utiles à l'ingénieur, est, par suite, la détermination des caractéristiques géotechniques des différentes parties de profils d'altération typiques. Ces études constituent un cadre au moyen duquel de nouvelles informations et de nouvelles expériences peuvent être coordonnées.

LATERITES HYDRATEES ET DESHYDRATEES

Dans les régions continuellement humides, les produits résultant du processus de latéritisation sont probablement caractérisés par des teneurs en eau élevées, des limites de liquidité élevées et des changements irréversibles provoqués par un séchage. Dans la mesure où la limonite et la goethite sont des hydroxydes de fer et où la gibbsite est un hydroxyde d'aluminium, le séchage modifie les caractéristiques des matériaux d'une manière notable. La plasticité décroît et les dimensions des grains augmentent, parce qu'une grande partie des constituants, ayant des dimensions égales à celles des argiles s'agglomèrent pour former des particules de la grosseur des limons. Lorsque l'ingénieur doit travailler avec de tels matériaux, il se peut qu'il doive non seulement déterminer les propriétés caractéristiques et géotechniques par des essais effectués à la teneur en eau naturelle, mais aussi après différents degrés de séchage à l'air, afin d'évaluer toute l'étendue des gammes des propriétés associées aux conditions physiques qui peuvent se produire sur le site. De sérieux problèmes géotechniques et de construction se sont produits, parce qu'on n'a pas su reconnaître les matériaux susceptibles de subir des changements irréversibles lorsqu'ils sèchent.

D'autre part, dans les régions soumises à des saisons humides et sèches distinctes, il est probable que les produits de la latéritisation soient caractérisés par des teneurs en eau naturelle et une plasticité faibles et par la présence de concrétions et d'horizons cimentés. Le mouvement alterné de l'eau vers le haut et vers le bas, entraîne la concentration du fer ou de l'alumine. Les essais de laboratoire effectués à la teneur en eau naturelle ou à partir d'un état résultant d'un séchage à l'air, conduisent essentiellement aux mêmes résultats.

Les différences de comportement entre les formes hydratées et déshydratées des sols latéritiques méritent qu'on y prête attention, à cause du danger qu'il y a d'être conduit en erreur par des rapports de la littérature dans lesquels la signification de cette distinction n'est peut être pas perçue

Il a été trouvé au cours d'une étude récente[+] que la plupart des sols tropicaux altérés d'Afrique peuvent être divisés en trois groupes. Ce sont les sols ferrugineux, les sols ferrallitiques et les ferrisols. Les propriétés moyennes de ces sols sont données sur le Tableau de la page 7 .

Les sols ferrugineux se trouvent dans les régions extrêmes les plus arides de la zone latéritique, avec des saisons sèches très prononcées. Ils se sont formés sur tous les types de roche : ignée, métamorphique et sédimentaire. Dans tous ces

---

[+] "Les latérites, les sols latéritiques et d'autres sols difficiles d'Afrique" par Lyon Associates, Inc. (Baltimore, Maryland, U.S.A) et le Building and Road Research Institute (Kumasi, Ghana). Rapport fait pour l'Agency for International Development, U.S.A, Contrat AID/csd-2164.

PROPRIETES MOYENNES DES SOLS FERRALLITIQUES DES FERRISOLS ET DES SOLS FERRUGINEUX

LIMITES D'ATTERBERG

	SOLS FERRALLITIQUES GHANA			FERRISOLS GHANA			SOLS FERRUGINEUX GHANA		
	LL	PL	PI	LL	PL	PI	LL	PL	PI
$\bar{X}$ (moyenne)	42	24	19	46	33	23	31	18	14
σ (écart type)	12	7	7	11	6	7	11	3	9
N (nombre d'échantillons)	(41)	(41)	(41)	(46)	(46)	(46)	(47)	(47)	(47)

	Autres pays			Autres pays			Autres pays		
	LL	PL	PI	LL	PL	PI	LL	PL	PI
$\bar{X}$	47	24	23	55	29	27	33	12	15
σ	13	8	7	17	9	12	11	6	8
N	(35)	(35)	(35)	(12)	(12)	(12)	(32)	(32)	(32)

GRANULOMETRIE

SOLS FERRALLITIQUES GHANA

Tamis	$\bar{X}$	σ	N
1	99	2	(20)
3/4	96	6	(20)
1/2	92	10	(20)
3/8	86	14	(20)
4	70	19	(20)
10	54	22	(20)
40	46	18	(20)
200	34	16	(20)
2m	19	8	(20)

FERRISOLS GHANA

Tamis	$\bar{X}$	σ	N
1	95	9	(16)
3/4	94	10	(16)
1/2	90	12	(16)
3/8	86	14	(16)
4	73	21	(16)
10	52	29	(16)
40	40	23	(16)
200	37	20	(16)
2m	25	16	(11)

SOLS FERRUGINEUX GHANA

Tamis	$\bar{X}$	σ	N
1	99	2	(19)
3/4	98	3	(19)
1/2	96	5	(19)
3/8	93	8	(19)
4	75	16	(19)
10	51	19	(19)
40	46	22	(19)
200	30	16	(19)
2m	13	7	(15)

Autres pays

Tamis	$\bar{X}$	σ	N
1	99	3	(36)
3/4	97	6	(36)
1/2	94	10	(36)
3/8	90	13	(36)
4	80	21	(36)
10	70	28	(36)
40	56	25	(36)
200	40	20	(36)
2m	26	14	(18)

Autres pays

Tamis	$\bar{X}$	σ	N
1	100	0	(13)
3/4	99	1	(13)
1/2	97	4	(13)
3/8	92	8	(13)
4	74	18	(13)
10	61	26	(13)
40	51	28	(13)
200	44	27	(13)
2m	24	20	(13)

Autres pays

Tamis	$\bar{X}$	σ	N
1	99	1	(35)
3/4	98	5	(35)
1/2	94	9	(35)
3/8	89	12	(35)
4	76	20	(35)
10	65	24	(35)
40	51	21	(35)
200	32	15	(35)
2m	16	8	(35)

COMPACTAGE AASHO MODIFIE - CBR

	SOLS FERRALLITIQUES GHANA			FERRISOLS GHANA			SOLS FERRIGINEUX GHANA		
	OMC	MDD	CBR	OMC	MDD	CBR	OMC	MDD	CBR
$\bar{X}$	12	129	46	14	122	42	10	133	75
σ	4	13	30	5	14	26	3	8	53
N	(38)	(38)	(33)	(43)	(43)	(39)	(40)	(40)	(40)

	Autres pays			Autres pays			Autres pays		
	OMC	MDD	CBR	OMC	MDD	CBR	OMC	MDD	CBR
$\bar{X}$	13	117	24	21	108	14	13	124	33
σ	4	9	17	7	14	11	4	11	23
N	(12)	(3)	(11)	(9)	(7)	(9)	(19)	(19)	(17)

sols, exception faite de ceux qui sont suffisamment humides pour que le dessèchement saisonnier ne se produise pas, la déshydratation des minéraux de fer et des minéraux d'aluminium -moins abondants- s'est produite. Les cuirasses ferrugineuses dures et durables sont courantes. La gibbsite qui fait partie des minéraux d'aluminium ne s'y trouve pas ou y est rare. De même, l'halloysite ou l'allophane ne s'y rencontrent pas. L'absence de ces minéraux et le degré d'oxydation (déshydratation) excluent des changements significatifs de propriété avec le séchage à l'air. Le fait que ces sols aient des limites d'Atterberg plus basses, des densités et des valeurs de CBR plus élevées, peut être expliqué par la déshydratation et l'agrégation. On s'attendrait à ce que des minéraux hydratés aient des limites de plasticité et de liquidité plus grandes.

Les sols ferrallitiques se rencontrent dans les parties extrêmes les plus humides de la zone des sols latéritiques et dans des régions où la végétation est dense. Ces sols se sont également formés sur tous les types de roches. La gibbsite y est un des minéraux argileux courants; on y trouve également d'autres formes d'alumine hydratée ainsi que des minéraux de fer hydratés. L'halloysite est relativement courante sur des roches volcaniques et à un degré moindre sur les intrusions basiques relativement peu étendues qu'on trouve en Afrique occidentale. Il se produit des changements de propriété avec le séchage dus à l'halloysite hydratée (qui, en général, ne se trouve que dans les régions continuellement humides) et à un degré moindre à la gibbsite. Les cuirasses ou horizons durcis sont aussi relativement courants. Celles-ci n'ont pas subi une déshydratation aussi complète que celle des cuirasses des régions ferrugineuses et elles n'ont, par conséquent, pas atteint leur dureté et leur durabilité. Les concrétions nodulaires dans des horizons relativement peu profonds peuvent, cependant, être aussi dures et aussi durables que celles des sols ferrugineux. On peut aussi s'attendre à ce que les sols ferrallitiques durcissent une fois exposés à l'air. La déshydratation est normalement empêchée par la couverture végétale dense, mais ce processus n'est plus empêché une fois que le sol est exposé.

Les ferrisols se sont formés sur tous les types de roche dans des régions où la pluviosité est moyenne ou forte et où l'érosion a progressé à la même vitesse que le développement du profil. La kaolinite est prédominante, mais la goethite s'y trouve également. Le degré d'hydratation des matériaux argileux est élevé ce qui entraîne des propriétés semblables à celles des sols ferrallitiques. Les changements de propriétés avec la déshydratation sont considérés comme mineurs lorsqu'ils sont dus à l'agrégation des minéraux de fer, mais ils peuvent être significatifs dans les sols de roches volcaniques où se trouve de l'halloysite hydratée.

Le climat est le facteur le plus important de la formation des divers groupes de sol. D'autres facteurs sont les matériaux de départ, la végétation, le drainage et le temps ; ces facteurs peuvent être la cause de modifications locales à l'intérieur d'un même groupe de sol.

La pluviométrie annuelle moyenne pour chaque groupe de sol est sur

- les sols ferrugineux de 24 à 72 pouces (600à 800mm)
- les sols ferrallitiques de 60 à plus de 160 pouces (de 1500 à plus de 4000 mm)
- les ferrisols de 50 à 110 pouces (1250 à 2750 mm)

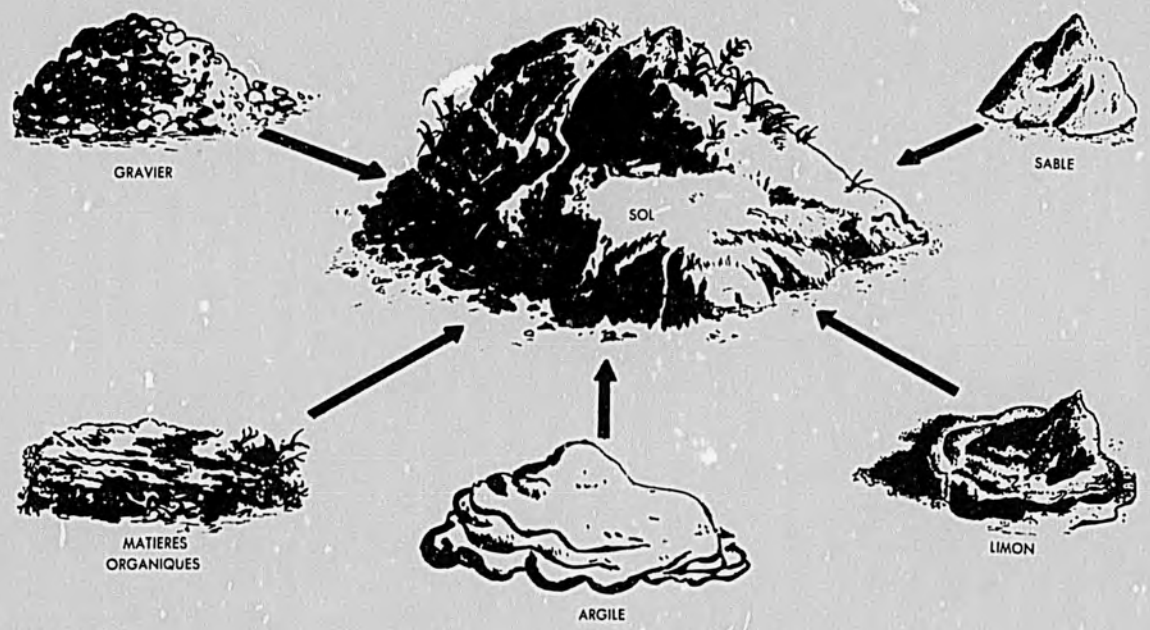
Il existe une corrélation générale entre les divers groupes de sols et la végétation en Afrique. La forêt humide (forêt pluviale) couvre en général des sols ferrallitiques à des altitudes basses à moyennes, tandis que les ferrisols couvrent des bois et des savanes (d'un type relativement humide). Les sols ferrugineux sont couverts de steppes et de savannes boisées et herbeuses.

Un sous-groupe des sols ferrallitiques a des propriétés qui s'écartent considérablement de la moyenne. C'est le sous-groupe des sols ferrallitiques sableux. Leur teneur anormale en sable provient du matériau de départ, constitué soit des sables côtiers, soit de sables sédimentaires continentaux des bassins intérieurs. Les dépôts de ces sols forment de grandes parties des bassins du Congo et du Kalahari et sont restreints par ailleurs à de minces franges cotières. Les roches-mère de ces sols sont géologiquement jeunes et contiennent un pourcentage élevé de quartz résistant . Les effets du climat n'ont pas encore eu suffisamment de temps pour altérer chimiquement les constituants et pour dissoudre une partie importante du quartz.

IDENTIFICATION DES SOLS SUR LE TERRAIN

Une identification correcte est nécessaire à un contrôle sérieux des sols. Le manque de temps et d'équipement rend souvent des essais de classification détaillés impossibles dans la construction militaire. La capacité d'identifier les sols sur le terrain par une simple inspection visuelle et un examen à la main est importante puisque des décisions vitales doivent souvent être basées sur des identifications sur le terrain. Même lorsqu'on dispose du temps et des appareillages pour les essais de laboratoire, un examen est fait sur le terrain lorsque l'échantillon est prélevé afin de décrire proprement le sol.

CLASSIFICATION ET DESCRIPTION



Principaux types de sol

Pour l'identification et la classification, tous les sols peuvent être groupés en 5 types de base et diverses combinaisons : gravier, sable, limon, argile et matières organiques. Les sols naturels existent rarement sous la forme d'un de ces types, mais ils sont le plus souvent constitués d'un mélange. L'identification et la classification sur le terrain dépend de la reconnaissance des types de base et des caractéristiques des mélanges de sol.

Description générale des types de base

Les graviers se composent de grains de minéraux massifs dont le diamètre est supérieur à 1/4 de pouce environ. Les gros éléments sont appelés des pierres et ceux de plus de 10 pouces environ sont appelés des moellons.

Les sables se composent de grains de minéraux dont le diamètre varie environ de 1/4 à 0,002 pouce (0,05 mm).

Les limons se composent de grains de minéraux naturels inférieurs à 0,002 pouce; ils manquent de plasticité et n'ont que peu ou pas de résistance à sec.

Les argiles contiennent des particules colloïdales ressemblant à des écailles et qui sont à l'origine de la plasticité. La plasticité et la résistance à sec sont affectées par la forme et la composition minérale des particules.

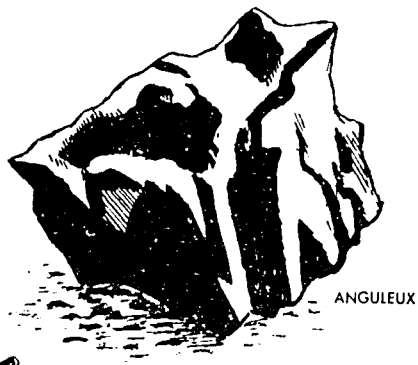
Les matières organiques se composent soit de végétation partiellement décomposée comme dans les tourbières ou de matières végétales finement divisées comme dans les limons et les argiles organiques.

ESSAIS D'IDENTIFICATION SUR LE TERRAIN

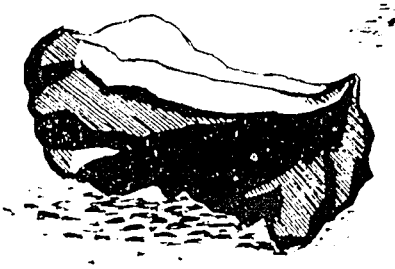
Les essais simples suivants peuvent être effectués sans appareil et sont utiles à l'identification des sols.

Il ne faut pas prendre une décision en se basant sur un seul essai, mais il faut utiliser tous les essais applicables.

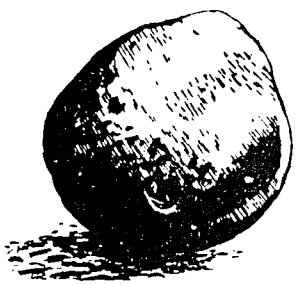
SUBANGULEUX



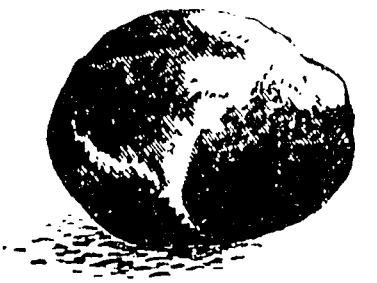
ANGULEUX



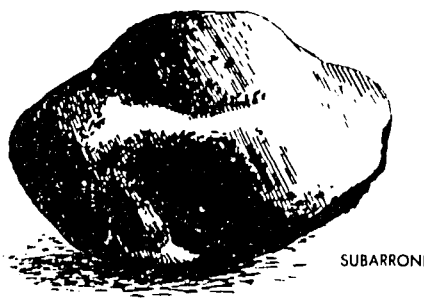
ANGULEUX



TRES ARRONDI



ARRONDI



SUBARRONDI

Inspection visuelle

Forme des grains. Observer et classer les particules de sable et de gravier suivant qu'ils sont plus ou moins anguleux ou rond.

Dimension des grains et granulométrie. Les grains de la dimension des sables et des graviers sont facilement identifiés par inspection visuelle. Les grains individuels plus petits que le sable le plus fin ne peuvent être vus à l'oeil nu et doivent être identifiés par d'autres essais.

Pour la granulométrie des sols à gros grains, étaler un échantillon représentatif sur une surface plate et observer la distribution ou l'uniformité des dimensions des grains.

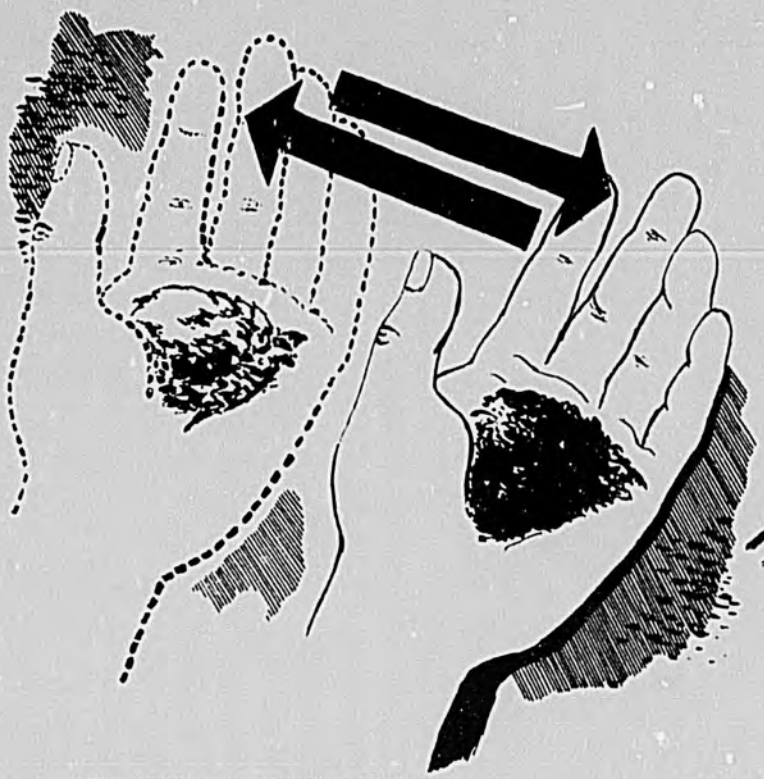
Pour la granulométrie des sols à grains fins, secouer l'échantillon dans un bocal rempli d'eau et attendre que le sol se soit déposé. Une granulométrie approximative est indiquée par la séparation des particules dans le bocal de haut en bas. Le limon reste en suspension pendant au moins une minute et l'argile pendant une heure ou plus.

Essai aux secousses

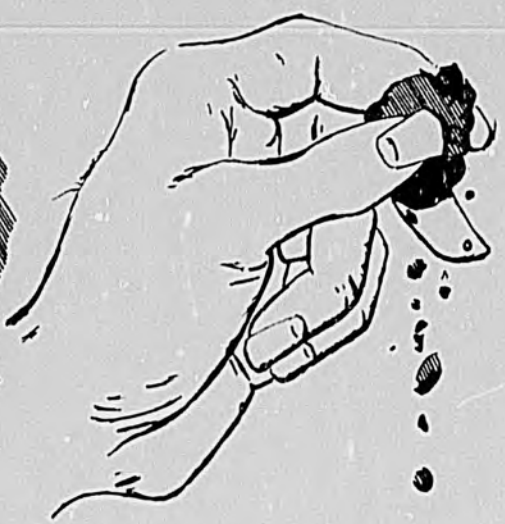
L'essai aux secousses est utile à l'identification des sols à grains fins.

Préparer un peu de sol humide (essayer plusieurs boulettes à des teneurs en eau différentes) et le secouer horizontalement dans la paume de la main.

Observer si de l'eau vient à la surface de l'échantillon en le faisant apparaître mou et lustré. Ensuite serrer l'échantillon entre les doigts ce qui fait disparaître l'eau de la surface qui de brillante prend une apparence terne. En même temps, l'échantillon se raffermit et finalement s'émiette sous une pression accrue des doigts. Secouer les morceaux jusqu'à ce qu'ils s'agrègent et forment de nouveaux une pâte continue.



ACTION DE SECOUER L'ECHANTILLON HUMIDE



POUR EMIETTER L'ECHANTILLON ENTRE LES DOIGTS

Distinguer entre une réaction lente, moyenne ou rapide à l'essai aux secousses.

Une réaction rapide indique un manque de plasticité comme dans les cas d'un limon inorganique typique, d'une farine de roche ou d'un sable très fin.

Une réaction lente indique un limon légèrement plastique ou un limon argileux.

S'il n'y a pas de réaction, il s'agit d'une argile ou d'un matériau tourbeux (organique).

Essai de rupture

L'essai de rupture peut être utilisé pour déterminer la résistance à sec d'un sol qui est une mesure de sa cohésion.

Permettre à une petite quantité d'échantillon de sécher et essayer sa résistance à sec en l'écrasant avec les doigts. Apprendre à distinguer entre résistance à sec faible, moyenne et élevée. Avant de sécher l'échantillon, enlever toutes les grosses particules qui risquent d'interférer avec l'essai.

Une résistance à sec faible indique un limon inorganique, une farine de roche ou un sable limoneux. Le sable est cependant granuleux au toucher lorsque l'échantillon est pulvérisé.

Une résistance à sec moyenne indique une argile inorganique de plasticité faible à moyenne. Il faut une pression des doigts considérable pour écraser l'échantillon.

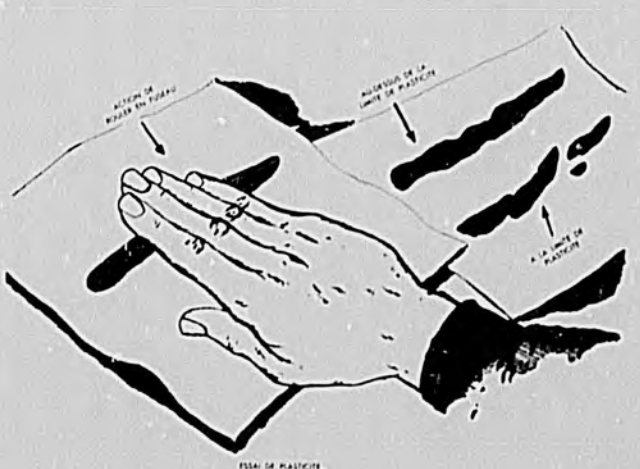
Une résistance à sec élevée indique une argile inorganique très plastique. L'échantillon séché peut être cassé en morceaux,mais ne peut être réduit en poudre sous la pression des doigts.

Note : La cohésion ou une résistance à sec élevée peut être fournie par certains matériaux de cimentation tels que le carbonate de calcium ou l'oxyde de fer. Par exemple,des roches calcaires non plastiques ou des cornux peuvent développer des résistances à sec élevées.

Essais de plasticité

La plasticité est la propriété physique d'un sol à grains fins qui, à une teneur en eau adéquate, permet de le pétrir jusqu'à ce qu'il prenne une consistance de mastic.

Pour essayer la plasticité d'un sol, préparer une boulette de sol humide et enlever les particules grossières. Commencer à le rouler avec la paume de la main sur une surface plate jusqu'à obtenir un fuseau d'un diamètre de 1/8 de pouce



ESSAI DE PLASTICITE

environ. Replier le fuseau sur lui-même pour en faire une masse compacte, rouler de nouveau et répéter le processus jusqu'à ce que les pertes d'humidité fassent que le fuseau se morcelle lorsqu'il est roulé. La teneur en eau à ce stade est appelée la limite de plasticité. Noter la dureté des fuseaux lorsque la limite de plasticité est atteinte et essayer de voir si on peut de nouveau former une masse unie avec les morceaux.

Tout sol qui peut facilement être roulé en un fuseau sans se morceler est plastique.

Une argile très plastique forme un rouleau cohérence qui peut être reroulé en une masse au-dessous de la limite de plasticité et être déformé sans se morceler sous une forte pression des doigts.

Un sol moyennement plastique forme un rouleau faible qui ne peut être remis en une seule masse au-dessous de la limite de plasticité. Les sols plastiques contenant des matières organiques ou beaucoup de mica forment des rouleaux qui sont très mous et spongieux.

Essai aux odeurs

Les sols organiques fraîchement prélevés ont d'ordinaire une odeur particulière qui aide à les identifier. L'odeur peut être rendue plus forte en chauffant un échantillon humide.

Essai à l'acide

Laisser tomber un peu d'acide chlorhydrique sur un morceau de sol. Une réaction effervescente indique la présence de carbonate de calcium.

Essai de brillance

Frotter un échantillon sec ou légèrement humide avec l'ongle d'un doigt ou la lame d'un couteau. Une surface brillante indique une argile très plastique ; une surface terne indique un limon ou une argile peu plastiques.

Essai d'extinction

L'essai d'extinction aidera à déterminer si un sol latéritique convient à la construction. Si une boulette faite de matériaux passant le tamis n° 40 se désintègre lentement lorsqu'elle est submergée dans de l'eau pendant 24 heures, le sol est d'ordinaire bon pour la construction. Si on dispose de suffisamment de temps, le processus de séchage et d'imbibition doit être répété pour voir si l'échantillon change de manière appréciable de cycle en cycle. Si la boulette se désintègre rapidement, le sol ne convient pas.

INSTALLATION D'UN LABORATOIRE

Conditions générales

Les conditions suivantes sont les plus importantes pour l'installation d'un laboratoire.

Les balances de torsion et les balances à triple levier gradué exigent une base ferme, horizontale et sans aucune vibration. Elles ne devraient pas être placées sur la même table que d'autres appareils d'essai et elles doivent être protégées des courants d'air.

Le réchaud à essence et l'étuve doivent être protégés des courants d'air. Un auvent n'est pas très efficace lorsque la température de l'étuve doit être contrôlée avec soin.

Les appareillages de compactage exigent une fondation ferme, la meilleure étant un sol en terre ou en béton. Sur un plancher en bois, placer les appareils directement sur une poutre principale ou transversale.

Un éclairage adéquat est nécessaire pour lire les graduations et les balances.

L'eau courante est souhaitable. Si on ne peut en disposer, il faut prévoir une réserve d'eau en quantité suffisante au laboratoire pour laver, mélanger et détremper les échantillons.

Il est souhaitable de disposer d'un bureau pour noter et calculer les résultats.

Il faut de la place pour stocker les échantillons.

Laboratoire semi-permanent

Pour une utilisation efficace des appareils d'essai, il faut une pièce d'environ 8 pieds de large et de 14 pieds de long. En réarrangeant les appareils, on peut utiliser une pièce de dimensions différentes mais ayant approximativement la même surface.

Utilisation de bâtiments existants. Le sous-sol ou le rez-de-chaussé d'un bâtiment existant sont, en général, le plus satisfaisants pour un laboratoire à cause de l'air frais et humide et de la solidité du plancher. Le compactage d'échantillons à un étage supérieur dérange les autres occupants de l'immeuble à moins que les planchers ne soient solidement construits.

Conseils pour le laboratoire.

On donne les conseils suivants pour un laboratoire semi-permanent :

1. Garder à sa disposition des boîtes en métal et en carton, des sacs et d'autres récipients pour prendre et stocker les échantillons.
2. Préparer et avoir une réserve de feuilles d'essai.
3. Numéroter et marquer tous les récipients.
4. Peser avec précision tous les récipients et noter leur poids sur une feuille séparée ou les peindre directement sur les récipients.
5. Garder une réserve de matériaux d'emballage étanches comme de la cellophane, du papier paraffiné et du koroseal, pour pouvoir mettre les échantillons sous des emballages hermétiques.

APPAREILS

Généralités Les appareils de laboratoire pour les essais des sols présentés ci-dessous constituent l'équipement minimum d'un laboratoire semi-permanent de chantier.

DESCRIPTION ET UTILISATION

Tarière.

Utilisée pour l'exploration des sols et pour obtenir des échantillons en vrac. Maintenir les tranchants affutés en limant. Nettoyer et enduire de graisse ou d'huile de moteur pour empêcher de rouiller.

Rallonge de tarière.

Utilisée pour prolonger le manche afin de pouvoir creuser des trous de profondeurs supérieures à 4 pieds. Serrer fermement avec des clés à douille avant emploi.

Réchaud.

Utilisé pour le séchage rapide des échantillons. Brûler de l'essence légère ne contenant pas de plomb pour une efficacité d'utilisation et une durée de vie maximums. Si on utilise de l'essence contenant du plomb, il faut prévoir une ventilation suffisante pour éviter les effets néfastes des fumées. Suivre les instructions données avec le réchaud.

Etuve.

Utilisée avec le réchaud pour sécher les échantillons plus lentement.

Appareil de limite de liquidité

Utilisé pour effectuer l'essai de limite de liquidité.

Maintenir toutes les parties propres et vérifier fréquemment le réglage.

Note : Pour obtenir des résultats précis, la base doit être faite de caoutchouc dur. Quelques modèles en usage peuvent avoir une base en bois ; celle-ci doit être remplacée par une base en caoutchouc dur.

Balance de torsion

Utilisée pour des pesées comprises entre 100 et 4500 g. Ne pas surcharger. Protéger les couteaux de dommages possibles et maintenir à l'écart de la poussière. Vérifier le réglage quotidiennement et nettoyer les parties mobiles chaque semaine dans le cas d'un usage fréquent. Ne jamais laisser la balance avec des poids dans les plateaux et ne jamais utiliser les poids dans un autre but.

Balance à triple levier gradué

Utilisée pour des pesées de moins de 200 g. Donner les mêmes soins qu'à la balance de torsion.

Ensemble de grilles portatives et tamis.

Pour le tamisage de gros échantillons. Une seule grille peut être utilisée à la fois. La grille est verrouillée en place par le cadre, le crampon, la plaque de verrouillage et le manche. Protéger les grilles en fil métallique des dommages. Utilisé pour le tamisage et pour la séparation des matériaux grossiers des fines nécessaire à la préparation d'échantillons pour divers essais. Les grilles fines sont fragiles et ne doivent pas être maltraitées ou surchargées. Protéger toujours les tamis fins avec un gros tamis. Nettoyer les tamis après chaque analyse en brossant avec un pinceau. Réparer les tamis troués par soudure.

Les appareillages recommandés comprennent un certain nombre de tamis qui sont utilisés pour calibrer et pour déterminer les dimensions des grains des sols ou des agrégats utilisés dans la construction. Le diamètre normal des tamis est de 8 pouces. L'ensemble des tamis comprend un fond et un couvercle.

Appareillage pour l'Indice portant de Californie (CBR)

Utilisé pour l'essai CBR. Maintenir les parties métalliques non peintes propres et enduites d'huile pour empêcher la rouille lorsque l'appareil n'est pas utilisé.

Collier d'échantillonnage. Pour prendre des échantillons intacts,

Moule de compactage avec hausse et base. Pour le compactage des échantillons avant essai.

Comparateur. Utilisé pour les mesures précises du gonflement et de la pénétration. C'est un instrument de précision qui doit être gardé dans un endroit protégé lorsqu'il n'est pas en usage. Ne pas huiler. Traiter comme une montre.

Vérin hydraulique. Utilisé pour l'application des charges de l'essai de pénétration. Pour faire monter le vérin, tourner le robinet situé en bas fermement à droite, ensuite pomper avec le levier. Pour faire descendre le vérin, tourner le robinet lentement à gauche. Un bidon d'huile est fourni pour remplir le vérin; l'huile se met par le bouchon de remplissage où est également indiqué le niveau d'huile. Ne pas utiliser du fluide de frein ou d'amortisseur qui endommagerait le vérin. Vérifier occasionnellement le tarage du vérin avec des poids.

Appareils pour le compactage.

La dame et son fourreau sont montrés en haut de la photo. A gauche il y a un moule de compactage Soiltest standard, démonté, de 1/30 de pied cube pour les essais de sol. A droite, il y a un moule de CBR. Ces moules et les dames sont utilisés pour les essais de teneur en eau optimum et de compactage. Maintenir la dame et son guide propres pour que la dame tombe librement. Les trous en bas du cylindre de guidage doivent être maintenus ouverts pour permettre à l'air de s'échapper lors du mouvement descendant.

Outils divers

Lame de scie à métaux. Pour obtenir et araser des échantillons de sol intacts.

Pinceaux. Pour nettoyer les tamis et les récipients, et pour enrober les échantillons de paraffine. A garder propre et sec.

Burin. Pour des usages divers.

Limes. Pour affuter les tarières et les autres outils.

Couteau de boucher. Pour araser les échantillons de sol.

Pinces. Pour des usages divers.

Règle graduée en acier de 12 pouces. Pour des mesures de laboratoire précises, graduée en 16e, 32e et 64e de pouce.

Mètre à ruban en acier de 72 pouces. Pour des mesures précises sur le terrain. Gradué en 16e et 32e de pouce.

Tournevis. Pour des usages divers et le réglage des appareils.

Spatule. Pour malaxer et araser les échantillons de sol.

Cuillère . Pour creuser et pour mélanger les échantillons de sol.

Règle en acier. Pour vérifier les bouts des échantillons arasés et pour des usages divers.

Truelle. Pour mélanger, creuser et araser les échantillons et pour le quartage.

Clé à molette. Pour le réglage du cadre de chargement du CBR et pour des usages divers.

Clé à douille. Pour visser la rallonge de tarière et pour des usages divers.

Fournitures diverses

Paraffine.Utilisée pour enrober les échantillons pour qu'ils ne perdent pas d'eau. Il faut faire attention lorsqu'on la chauffe au-dessus d'une flamme libre puisqu'elle est très inflammable. Ne pas continuer à chauffer de la paraffine fondue, car elle risque d'être suchauffée et de brûler les pinceaux.

Crayons feutres à l'encre de chine. Pour marquer les étiquettes d'expédition et les appareils de laboratoire. Leur marquage n'est pas affecté par la chaleur ou l'humidité.

Fournitures d'utilité générale

Carnet de note	Blocs de mémos
Étiquettes gommées	Papier pour coupe en travers
Papier semi-logarithmique	Crayons
Sacs d'expédition	Serviettes, ficelle

Ustensiles divers

Sacs à échantillon. Pour prendre, transporter et stocker les échantillons. Les petits sacs à échantillon mesurent 10 par 18 pouces et peuvent contenir à peur près 20 livres de sol. Les grands sacs à échantillons mesurent 17 par 32 pouces et peuvent contenir à peu près 100 livres de sol. Après y avoir mis de l'argile humide, le retourner et le racler avec une règle ou une spatule. Le sécher ensuite et le battre contre une surface dure et lisse jusqu'à ce qu'il soit propre. Lorsque des sacs deviennent sales, les mettre à l'envers. Les laver occasionnellement dans de l'eau savonneuse chaude.

Boîtes métalliques. Utilisées comme récipient d'échantillons destinés à l'essai de teneur en eau. Les petites boîtes contiennent à peu près 4 onces et les grandes à peu près 8 onces. Numéroter chaque boîte et son couvercle et relever leur poids pour gagner du temps.

Seaux. Pour des usages divers et détremper les échantillons de CBR.

Eprouvette graduée de 100 cc. Utilisée pour mesurer des volumes de liquides. Garder propre et prête à être utilisé.

Toile de quartage. Garder propre et sèche.

Poire. Utilisée pour ajouter de faibles quantités d'eau lorsqu'on mélange les sols.

Moule ouvrant. Pour le compactage d'échantillons d'argile remaniée, pour l'essai de compression ou d'autres essais.

Ouvre-boîte. Pour enlever le couvercle de boîtes utilisées pour le prélèvement.

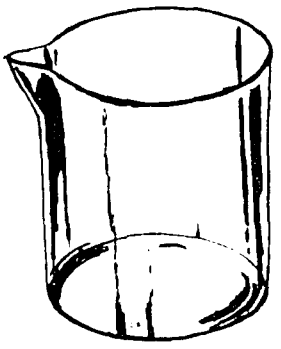
Casserolles. Pour sécher et mélanger les échantillons et pour des usages divers.

Thermomètre. Pour déterminer la température dans l'étuve de séchage.

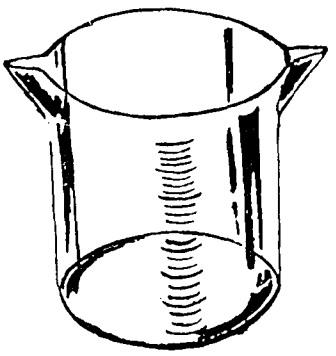
Chronomètre. Pour déterminer la vitesse de pénétration de la charge dans l'essai CBR.

USTENSILES COMPLEMENTAIRES

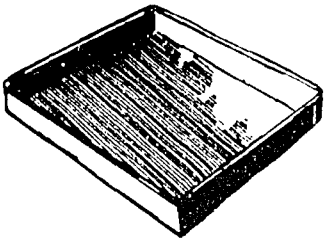
Lorsque l'ensemble des appareils ci-dessous est utilisé dans un laboratoire semi-permanent, il est souhaitable de le compléter par des ustensiles qu'on trouve parfois en stock dans le commerce et par des appareils improvisés, fabriqués avec des matériels locaux. Des suggestions d'appareils complémentaires sont illustrées ci-dessous.



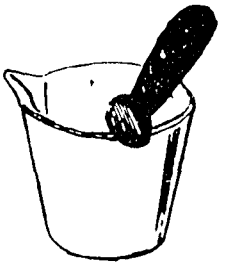
BECHER EN VERRE DE GOOME



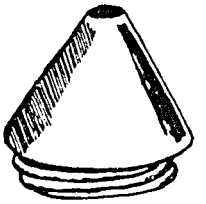
VERRE GRADUE DE 32 ONCES



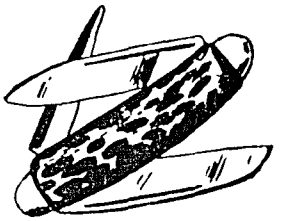
PLATEAU EN TOLE



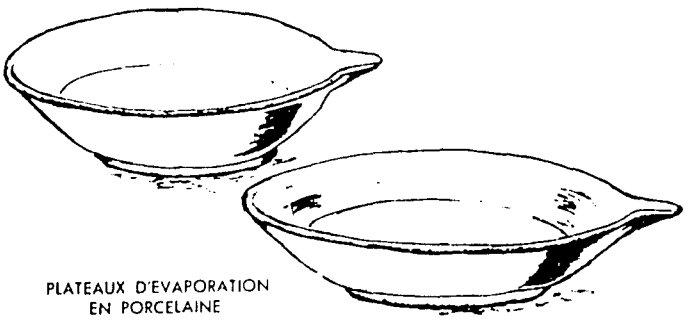
MORTIER ET PILON EN PORCELAINE DE 400ML



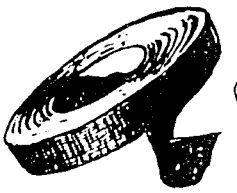
BOUCHON DE PICNO METRE (POUR UNE BOUTEILLE DE MAÇON DE 1 QUART)



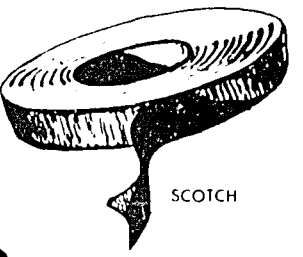
CANIF (POUR ARASER LES ECHANTILE LONS ET DES USAGES DIVERS)



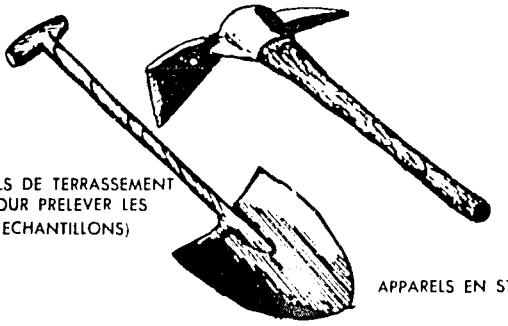
PLATEAUX D'EVAPORATION EN PORCELAINE



CHATTERTON

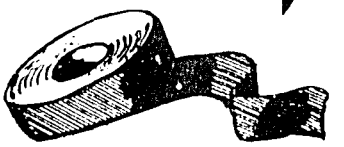


SCOTCH



OUTILS DE TERRASSEMENT (POUR PRELEVER LES ECHANTILLONS)

APPARELS EN STOCK DAN LE COMMERCE



RUBAN D'ETANCHEITE CAOUTCHOUTEUX (POUR ETANCHER LES EMBALLAGES D'EHANTILLONS DE TENEUR EN EAU OU INTACTS)

RECONNAISSANCE DES SOLS ET PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS

GENERALITES

Les types de sol à prélever, le nombre d'échantillons à prendre, ainsi que l'endroit et la manière dont les échantillons doivent être prélevés sont décidés par l'ingénieur chargé de la reconnaissance.

TYPES D'ECHANTILLONS

Echantillons mis en sacs.

Les échantillons mis en sacs sont pris à la pelle, à la tarière, ou à l'aide de n'importe quel autre outil à main commode et sont placés dans des sacs sans essayer de garder le sol dans un état intact.

Les échantillons mis en sac sont utilisés pour :

l'analyse granulométrique (page 34)

l'essai de plasticité (page 28)

l'essai de teneur en eau optimum (page 27)

l'essai CBR avec échantillon compacté au laboratoire (page 47)

Echantillons pour la détermination de la teneur en eau in-situ.

Pour déterminer la teneur en eau naturelle d'un sol, on prend des échantillons sur le chantier et on les place dans un récipient fermé hermétiquement pour empêcher la perte d'eau par évaporation.

Echantillons intacts

Un échantillon intact d'un sol est découpé, enlevé et emballé avec le moins de perturbation possible. Des échantillons intacts sont utilisés pour :

1. déterminer la densité (poids spécifique) au laboratoire (page 40)
2. étudier la résistance de sols non remaniés au laboratoire par le CBR (page 47)
3. les expédier à d'autres laboratoires pour un examen ou des essais spéciaux.

LOCALISATION, ENREGISTREMENT ET NUMEROTAGE DES ECHANTILLONS

C'est la responsabilité de l'ingénieur chargé de la reconnaissance de s'assurer que :

1. chaque fosse, forage ou toute autre excavation de reconnaissance soit numérotée et enregistrée et que son emplacement soit relevé.
2. un relevé de sondage soit tenue pour chaque trou d'essai.
3. chaque échantillon soit porprement numéroté étiqueté et préparé pour l'expédition.

Emplacement

L'emplacement de chaque fosse, forage ou autre excavation de reconnaissance est situé sur le terrain en mesurant ou en comptant les pas à angle droit à partir de l'axe de la route ou de la piste d'envol. Son emplacement, son type et son identification sont portés sur un plan ou sur un croquis dans un carnet.

TYPE	ABREVIATION	SYMBOLE
Fosse	Fs	□
Forage	Fr	○
Tranchée	T	▭

Il faut utiliser un système de symboles uniforme pour marquer les excavations sur les plans. Les symboles montrés ci-dessus sont courants.

Relevé de sondage.

Un relevé de sondage détaillée est tenue pour chaque excavation.

Les relevés doivent être complets et contenir toute information qui pourra être utile à l'interprétation des résultats d'essai et pour tracer les profils de sol.

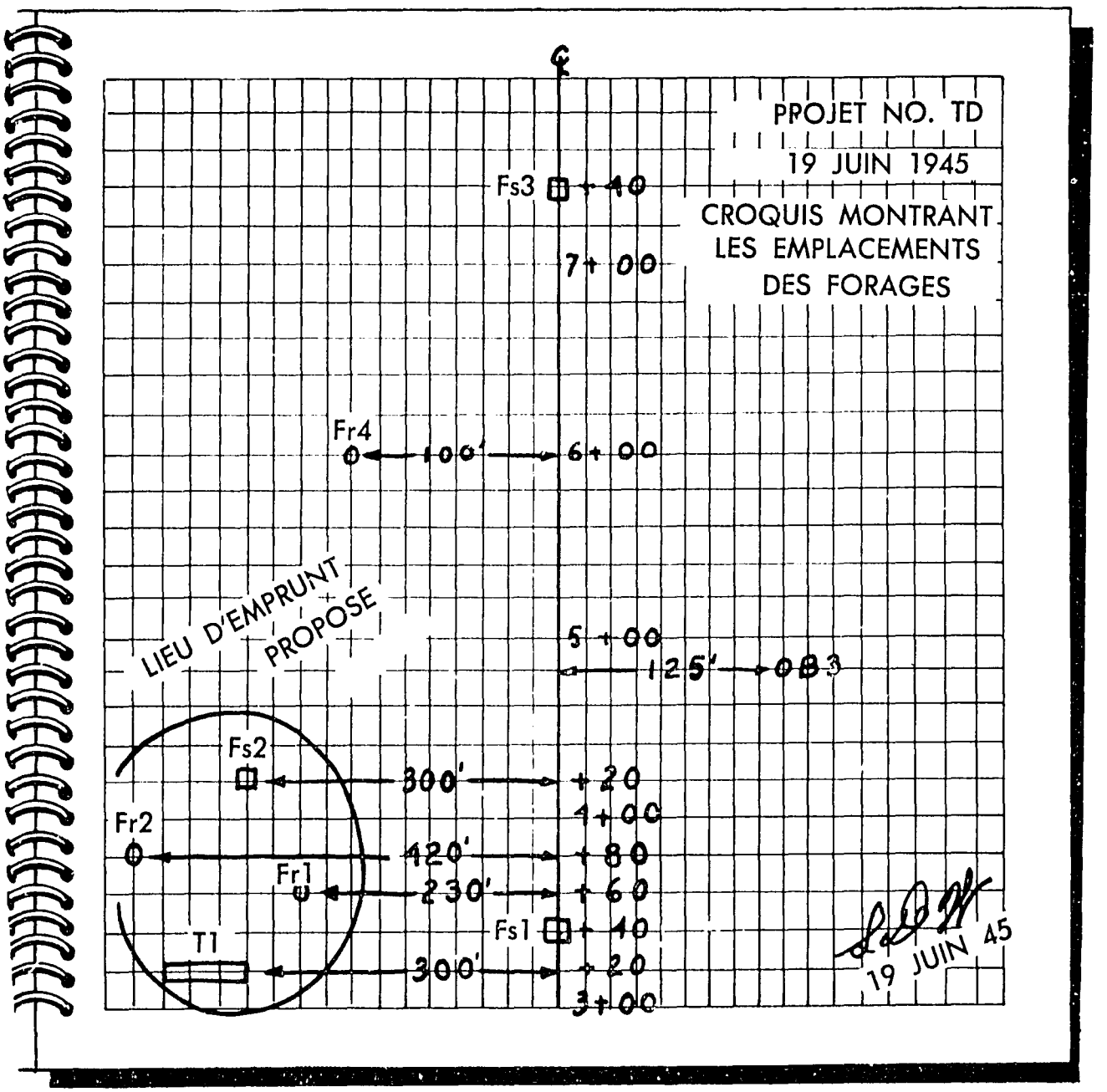
Numérotage des échantillons

Chaque échantillon est identifié par les renseignements suivants :

Un numéro de projet qui peut être un nombre, une abréviation ou un symbole. Par exemple, TD peut être utilisé pour Terrain de Dupont.

Un numéro d'excavation qui correspond à l'ordre de l'excavation de reconnaissance. Par exemple, Fs3 peut signifier que l'échantillon a été obtenu de la fosse N° 3.

Un numéro d'échantillon qui indique l'ordre dans lequel chaque échantillon a été pris à un emplacement donné. Si l'échantillon est constitué de plus d'un sac, le nombre total des sacs formant l'échantillon doit également être noté.


PROJET NO. TD
19 JUIN 1945
CROQUIS MONTRANT
LES EMPLACEMENTS
DES FORAGES
Fs3
7+00
Fr4
100'
6+00
LIEU D'EMPRUNT
PROPOSE
5+00
125'
0B3
Fs2
300'
+20
4+00
Fr2
420'
+80
Fr1
230'
+60
Fs1
+10
T1
300'
+20
3+00
19 JUIN 45

Un numérotage complet pourrait par exemple se présenter ainsi :

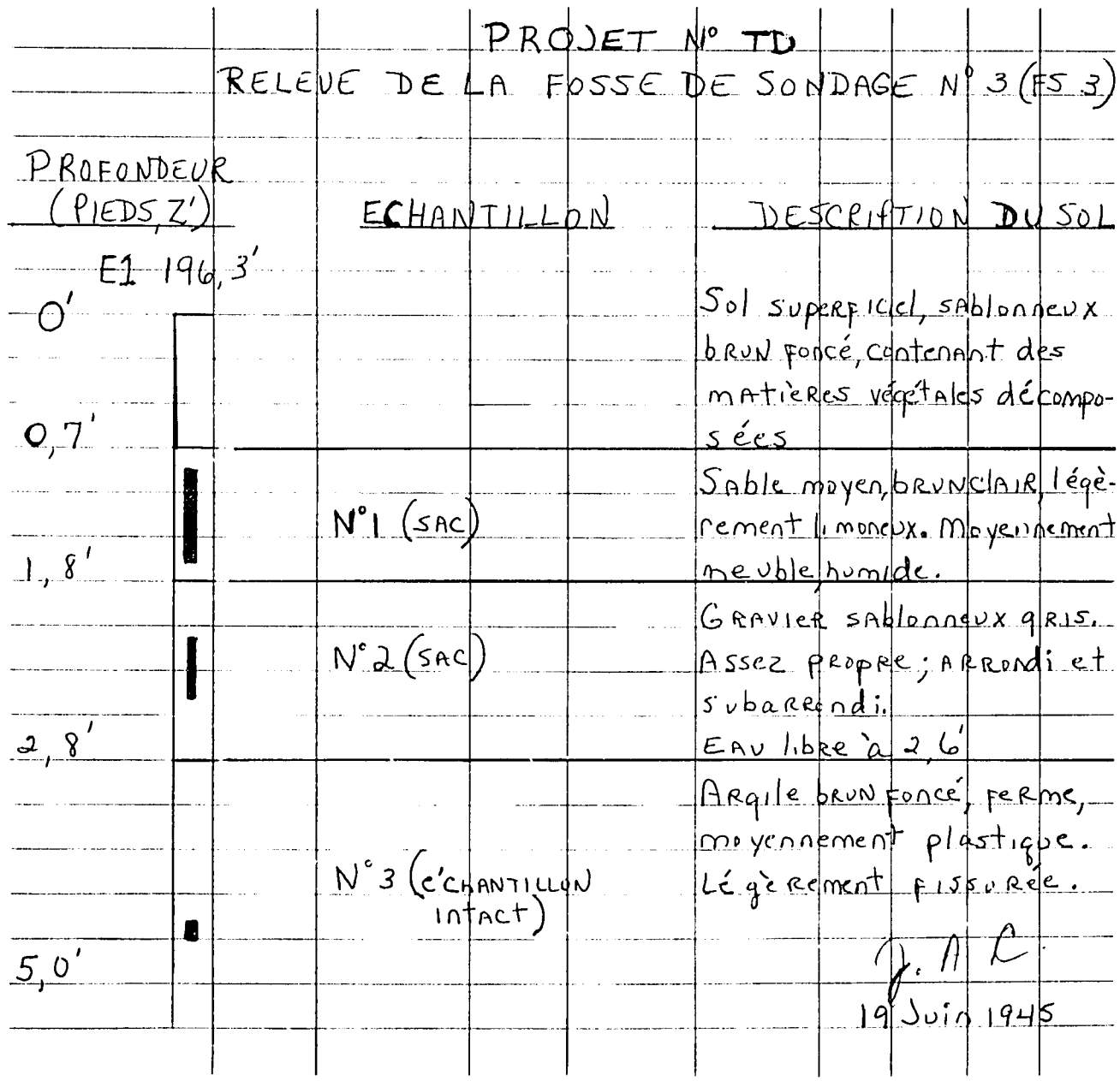
TD - Fs3 - 2

(1er sac sur 2)

Cette désignation veut dire que l'échantillon a été pris pour le projet TD, dans la fosse N° 3, que c'est le 2ème échantillon pris dans cette fosse et que c'est le sac N° 1 d'un ensemble de 2 sacs. Le numéro de l'échantillon est imprimé avec un crayon à encre indélébile sur une étiquette qui est attachée à l'extérieur du sac. Une étiquette identique est mise à l'intérieur du sac.

PROJET N° TD

RELEVE DE LA FOSSE DE SONDAGE N° 3 (FS 3)



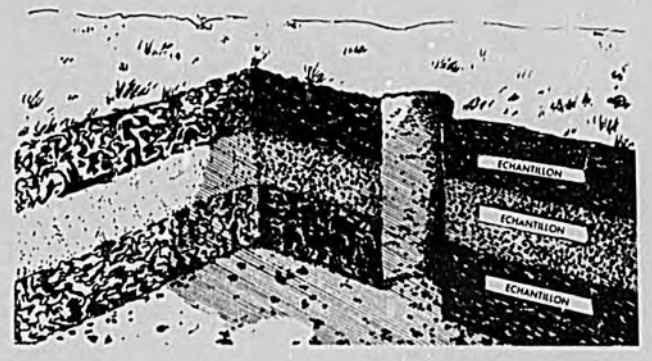
MODALITES DE PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS EN VRAC

Quantité.

Deux petits sacs ou la moitié d'un grand sac fournissent suffisamment de matériaux lorsque tous les essais courants sont prescrits.

Echantillons homogènes.

Lorsqu'on explore un sol devant recevoir une fondation, des échantillons homogènes en vrac sont pris de chaque type de sol particulier rencontré.



Pour prendre des échantillons de sol homogènes d'une fosse, d'une tranchée ou d'un front exposé :

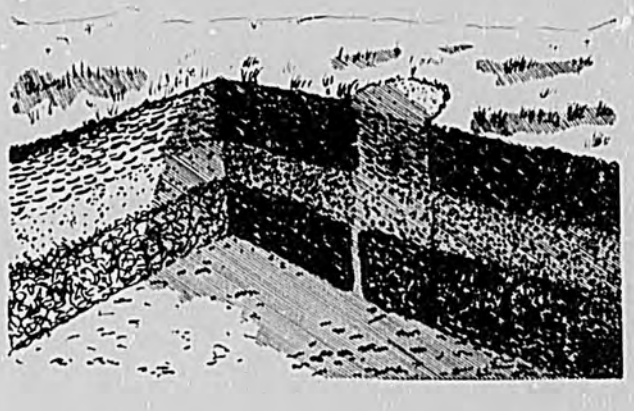
1. Décaper le sol meuble et sec pour obtenir une surface fraîche et pour exposer de manière nette toute variation dans le sol.
2. Prendre un échantillon représentatif de chaque type de sol ou des types nécessitant une étude supplémentaire.

Lorsqu'on prélève des échantillons de trous faits à la tarière :

1. Placer le sol excavé le long d'une rangée dans l'ordre correct
2. Prendre un échantillon représentatif de chaque type de sol.

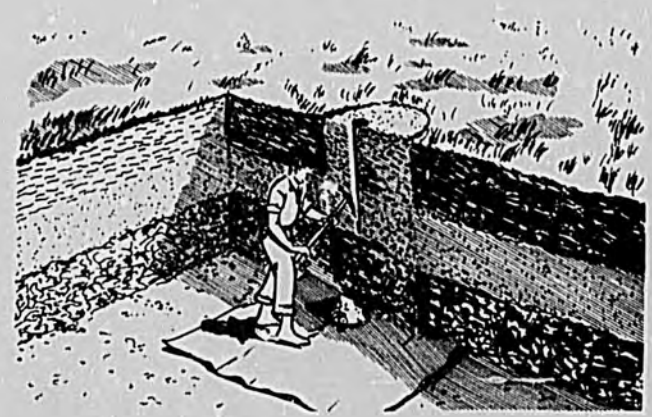
Echantillons composites

Le but d'un échantillon composite est l'obtention d'un mélange représentatif de tous les sols du profil étudié ou des matériaux contenus dans une pile de dépôt ou dans un cordon. Un échantillon d'essai est obtenu à partir d'échantillons composites par quartage au laboratoire (page 20).



Pour prendre des échantillons composites d'une fosse ou d'une tranchée d'essai, ou d'une tranchée creusée par une pelle mécanique :

1. Enlever tout sol sus-jacent ou sol superficiel qui doit être rejeté.
2. Racler tout sol meuble et séché pour obtenir une surface fraîche pour le prélèvement de l'échantillon.
3. Etaler la toile de quartage ou la bâche au pied du talus.
4. Creuser une entaille de section uniforme de haut en bas. Déposer le matériau sur la toile.
5. Rassembler et mettre en sacs l'ensemble des matériaux enlevés pour s'assurer que l'échantillon contient les proportions correctes.



Pour avoir un échantillon composite de trous forés à la tarière, collecter tous les matériaux sortis du trou après avoir d'abord enlevé le sol superficiel.

Pour préparer un échantillon composite d'une pile de stockage ou d'un grand cordon, prendre des soins particuliers pour obtenir un échantillon représentatif. Lorsque les matériaux sont jetés sur des piles hautes, les éléments grossiers ont tendance à rouler vers le bas et les matériaux plus fins à rester dans la partie supérieure.

Pour prélever un échantillon dans un petit cordon, creuser et mettre les matériaux d'un court tronçon dans un sac.

ECHANTILLONS POUR LA DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU

Quantité

Dix grammes suffisent pour déterminer la teneur en eau naturelle d'un sol à grains fins. Des échantillons beaucoup plus importants doivent être utilisés pour les sols graveleux.

Récipients

Les boîtes métalliques fournies avec l'ensemble des appareils ont des couvercles fermant hermétiquement et n'ont pas besoin d'être étanchées si l'essai est fait en moins de 24 heures après le prélèvement de l'échantillon. On suggère ci-dessous trois techniques pour assurer une fermeture étanche.

Tout autre récipient dont la fermeture du couvercle est rendue hermétique avec du chatterton ou de la paraffine peut être utilisé pour les échantillons de teneur en eau.

QUARTAGE DES ECHANTILLONS

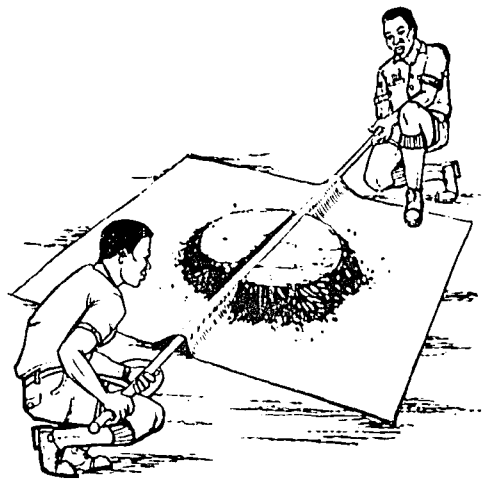
L'opération, consistant à réduire un échantillon représentatif jusque à une taille commode ou à le diviser en deux ou plus d'échantillons plus petits pour les essais, est appelée quartage.

Quartage des échantillons de plus de 100 livres.

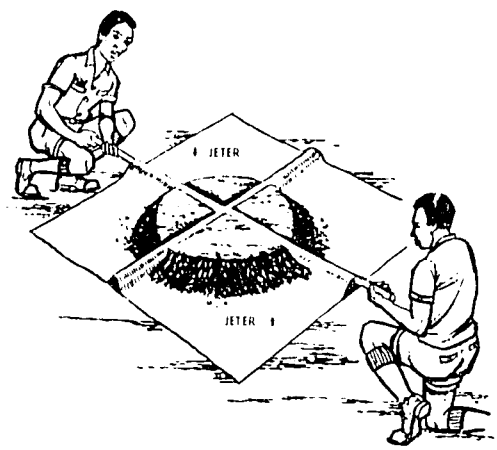
1. Mélanger et empiler l'échantillon sur la toile. Jeter chaque pelletée sur le sommet du cône pour que le sol roule de manière égale dans toutes les directions et pour que l'échantillon soit mélangé.
2. Applatir le cône avec une pelle de façon à

étaler le matériau en une couche circulaire d'épaisseur uniforme.

3. Glisser un bâton ou un tuyau sous la toile de manière à ce qu'il passe sous le centre de cette couche et soulever les deux bouts pour diviser l'échantillon en 2 parties. Enlever le bâton en laissant le pli dans la toile.

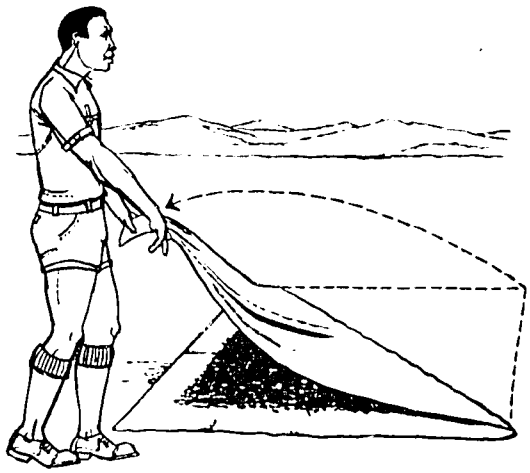


4. Glisser de nouveau le bâton sous le centre de la couche, mais à angle droit par rapport à la première division, et soulever de nouveau les deux bouts pour diviser l'échantillon en 4 parties.



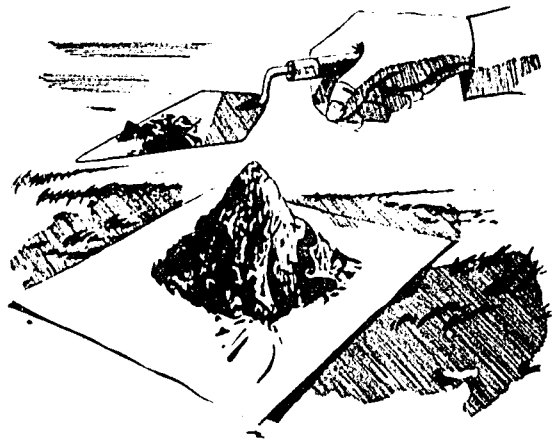
5. Rejeter deux quarts diagonalement opposés en prenant soin de bien enlever les fines de la toile.

6. Remélanger les matériaux restants en prenant alternativement une pelletée de chaque quart. Répéter les opérations de quartage jusqu'à ce que l'échantillon soit réduit à la dimension souhaitée.



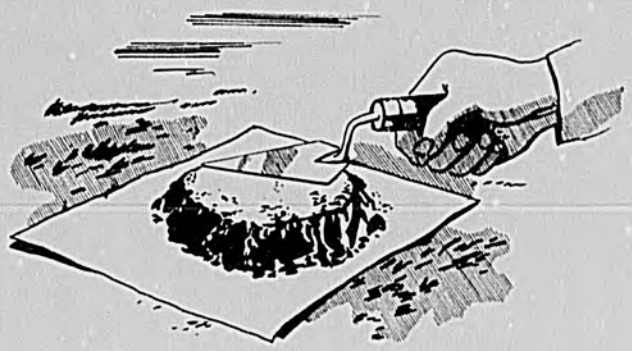
Quartage d'échantillons pesants, 25 à 100 livres.

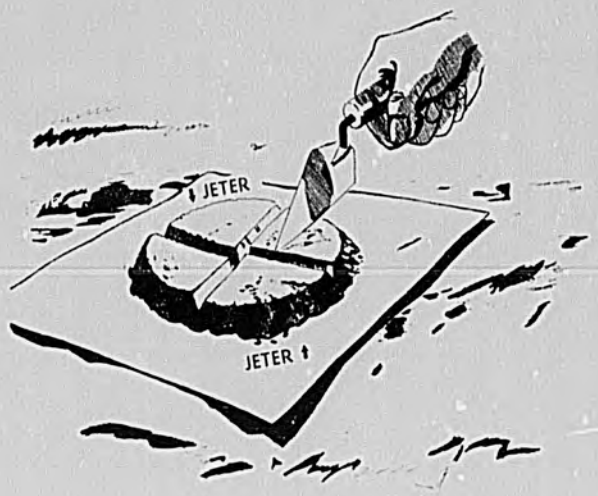
1. Empiler l'échantillon sur la toile et mélanger en soulevant alternativement les coins de la toile et en les tirant au côté opposé par dessus l'échantillon comme si on pliait la toile en diagonale.
2. Aplatir et faire le quartage comme ci-dessus.



Quartage d'échantillons de moins de 25 livres.

1. Placer l'échantillon sur la toile ou sur une feuille de papier propre. Bien mélanger avec une truelle et former une pile conique.





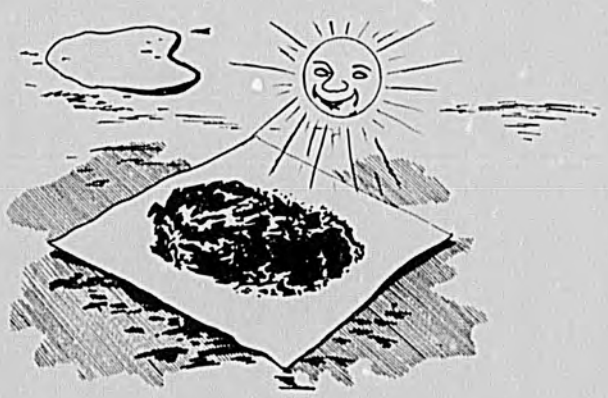
2. Aplatir le cône en appuyant sur son sommet avec la truelle.

3. Séparer en quarts avec la truelle et rejeter les quarts diagonalement opposés.

SECHAGE DES ECHANTILLONS

Quelques sols latéritiques subissent des changements dans leurs caractéristiques physiques lorsqu'ils sont soumis aux essais dans des conditions différentes. Le prétraitement à donner aux matériaux latéritiques doit être fonction des conditions qui seront effectivement rencontrées sur le chantier. Dans les régions de forte pluviosité, il peut être difficile de sécher les sols durant la construction. Dans ce cas, les essais doivent être faits en partant de la teneur en eau naturelle et on ne doit pas permettre aux échantillons de sécher au laboratoire. Si la construction a lieu pendant la saison sèche, ou dans une région de pluviosité faible, les échantillons doivent être séchés à l'air au laboratoire. LE PRETRAITEMENT DOIT REFLETER DANS TOUS LES CAS, LES CONDITIONS EFFECTIVEMENT RENCONTREES SUR LE TERRAIN. Pour cette raison, les échantillons ne doivent pas être séchés à l'étuve avant les essais puisque les sols ne sont jamais soumis à des températures aussi élevées in-situ.

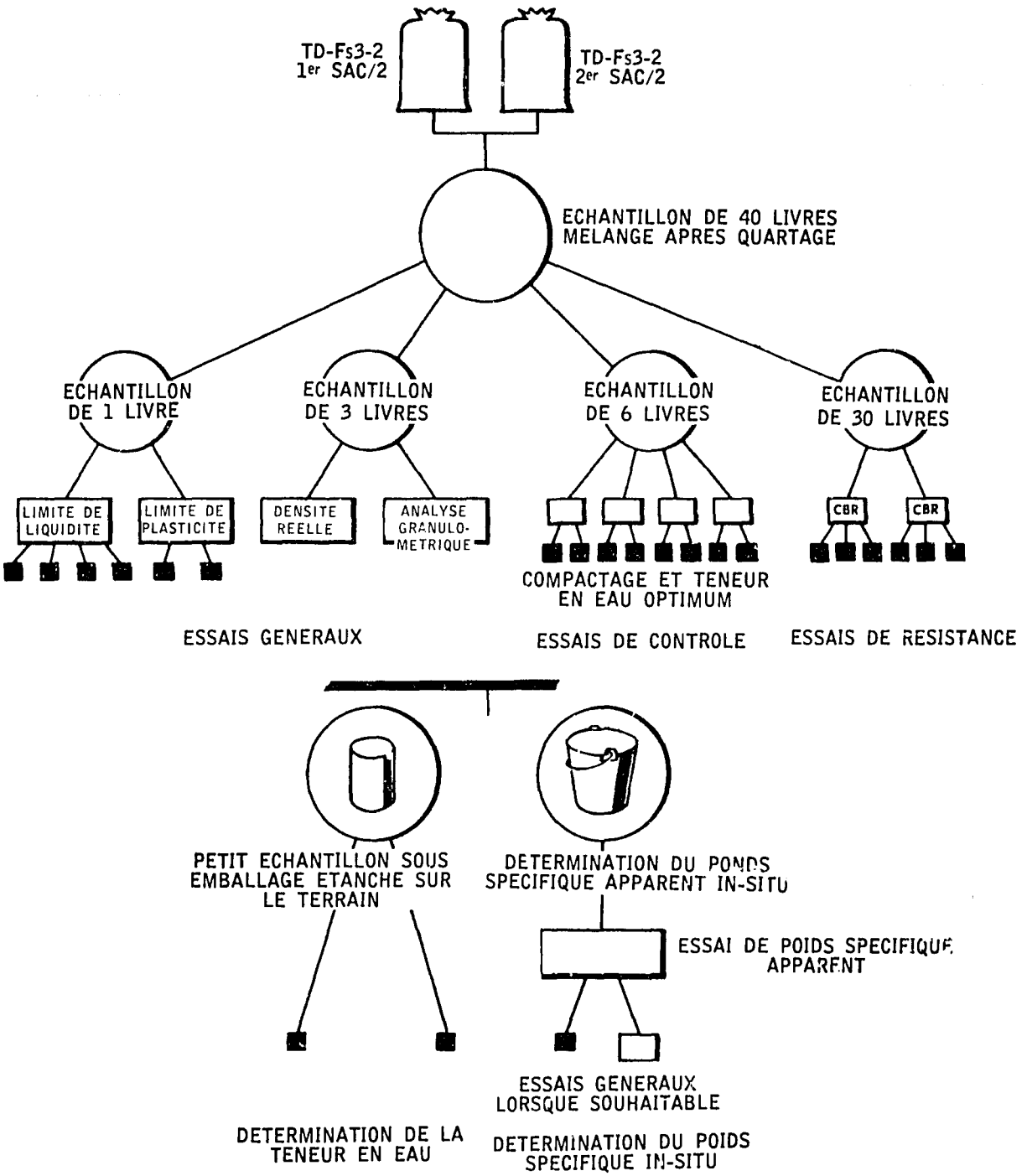
L'échantillon tel qu'il est reçu en provenance du terrain doit être brassé à fond et les agrégations doivent être soigneusement pulvérisées mais de manière à éviter de briser les grains naturels eux-mêmes. Ne pas sécher l'échantillon s'il doit être utilisé dans des essais faits à la teneur en eau naturelle.



Pour sécher le matériau à l'air, le mettre dans des plateaux ou l'étaler sur une toile et l'exposer aux rayons directs du soleil ou aux courants d'air. Si on le remue ou si on le brasse fréquemment, le séchage est accéléré.

Dans une atmosphère sèche le matériau sèche aussi facilement à l'intérieur du laboratoire ou à l'ombre. Un ventilateur soufflant de l'air par-dessus les échantillons augmente beaucoup la vitesse d'évaporation.

PROCESSUS DES ESSAIS



SYMBOLES

○ MATERIAU BRUT ▭ ESSAI COMME INDIQUE ■ ESSAI DE TENEUR EN EAU

Essais généraux

Les essais généraux sont utilisés pour l'identification des sols afin qu'ils puissent être proprement décrits et classés. Les essais généraux décrits dans ce livret sont :

- la détermination de la densité réelle
- l'analyse granulométrique
- les essais de plasticité

Essais de contrôle

Les essais de contrôle sont utilisés pour s'assurer que les sols sont proprement compactés durant la construction et que les normes prescrites par le projet soient ainsi respectées sur le chantier. Les essais décrits sont :

- le contrôle de la teneur en eau
- la détermination du poids spécifique apparent
- l'essai de compactage pour la détermination de la teneur en eau optimum

Remarque : l'essai de teneur en eau est mis avec les essais de contrôle bien qu'il soit également essentiel pour la classification et la détermination de la résistance.

Essais de résistance

Les essais de résistance sont utilisés pour déterminer la portance des sols et pour savoir si leur qualité convient à la construction. Les essais de résistance décrits ici sont :

- l'essai de l'indice portant de Californie (CBR)
- l'essai de résistance à la compression simple
- l'essai de chargement sur plaque d'appui
- l'essai au trafic

Quantités de sol nécessaires aux essais

Les quantités de matériaux nécessaire aux divers essais sont illustrées sur la page 23 . Il n'est pas nécessaire d'effectuer tous les essais sur chaque échantillon.

PESEE DES MATERIAUX

Quatre balances sont comprises dans l'équipement d'ensemble du laboratoire. Utiliser celle qui convient le mieux à la pesée à faire suivant le poids de l'objet et la précision exigée.

Type	Poids max.	Précision
balance dynamométrique de 40 livres	40 livres	0,1 livre
balance dynamométrique de 60 livres	60 livres	0,1 livre
balance de torsion	4500 g	5 g
balance à levier triple	200 g	0,01 g

Remarque :

Si on désire obtenir une précision de 0,1 g avec la balance de torsion, découper des clous ou des morceaux de ruban métallique pour en faire des petits poids, les tarer sur la balance à triple levier gradué.

Utilisation des balances dynamométriques.

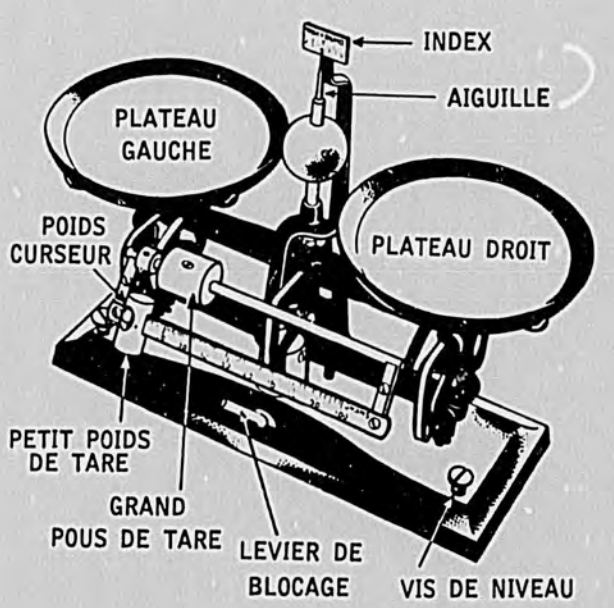
Attacher l'objet au crochet et suspendre la balance en soulevant par l'anneau supérieur.

Pour les objets pesant moins de 20 livres lire le poids directement sur le cadran circulaire.

Pour les objets pesant plus de 20 livres ajouter 20 ou 40 suivant l'indication de l'échelle mobile au chiffre lu sur le cadran pour obtenir le poids total. Si l'objet doit être pesé dans un récipient, suspendre d'abord le récipient puis placer l'aiguille rouge pour indiquer le zéro lorsque l'aiguille noire indique la tare. L'aiguille rouge donne alors le poids net de l'objet et l'aiguille noire le poids brut du récipient et de l'objet.

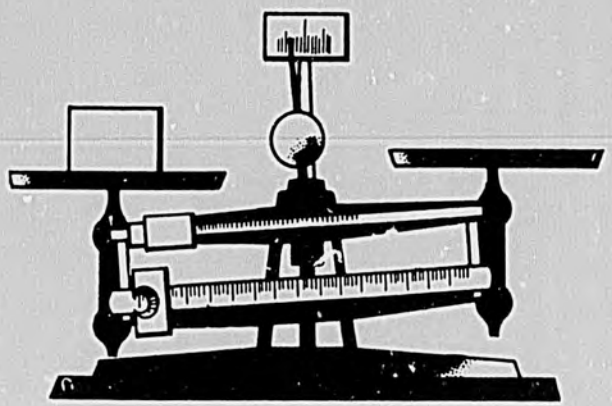
Utilisation de la balance de torsion

Pour installer la balance, la sortir de sa boîte et déverrouiller la balance en enlevant la petite plaque fixée sous sa base. Sortir les deux vis qui passent à travers le socle et entrent dans le fléau inférieur. Placer la balance sur une table ou sur un rayon solide et de niveau où il n'y a pas de vibrations. Mettre le poids curseur dans la position zéro et déplacer

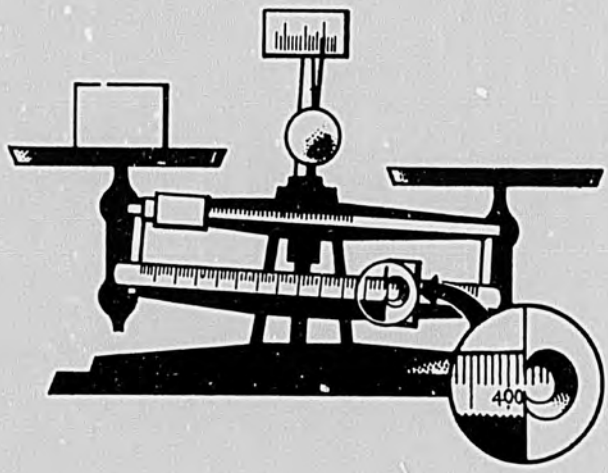


les poids de tarage vers la gauche jusqu'à ce que l'aiguille oscille de manière symétrique de chaque côté du centre de la graduation. Le réglage final est fait plus facilement en jouant sur la vis de niveau. Toujours mettre et enlever les poids avec précaution pour éviter d'endommager la balance.

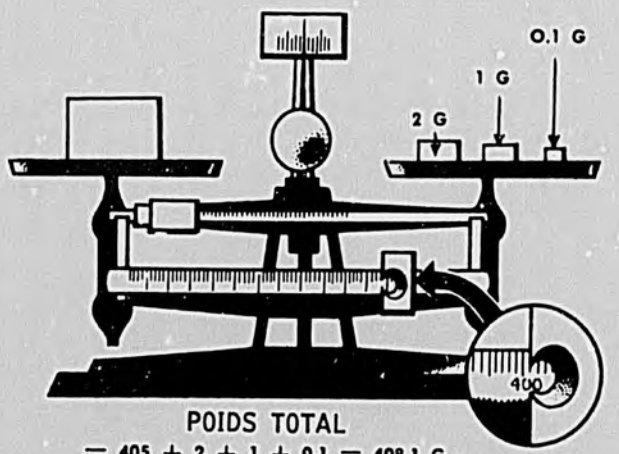
Pour peser des objets de moins de 500 g :



1. Placer l'objet à peser dans le plateau de gauche. L'aiguille va partir vers la gauche.



2. Glisser le poids curseur vers la droite jusqu'à ce que l'aiguille parte de ce côté. Le déplacer ensuite d'un cran (5 g) vers la gauche.

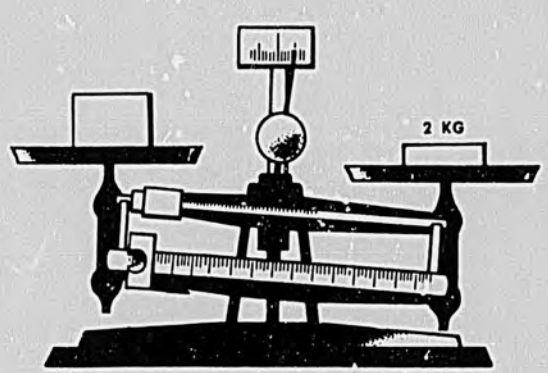


POIDS TOTAL
= 405 + 2 + 1 + 0.1 = 408.1 G

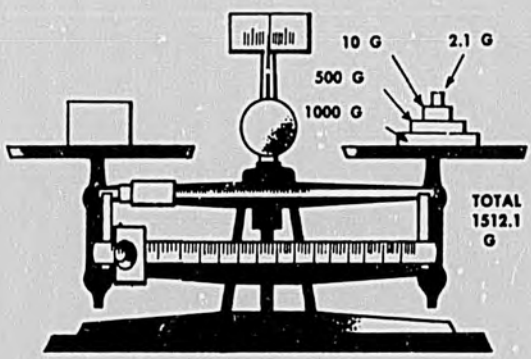
3. Ajouter des petits poids dans le plateau de droite jusqu'à ce que l'aiguille oscille symétriquement par rapport au milieu de la graduation. Le poids total est la somme des petits poids plus le poids indiqué par le curseur.

Pour peser des objets de plus de 500 g :

1. Placer l'objet à peser dans le plateau de gauche et le poids le plus grand ou un poids plus lourd que l'objet dans le plateau de droite. L'aiguille va partir vers la droite.

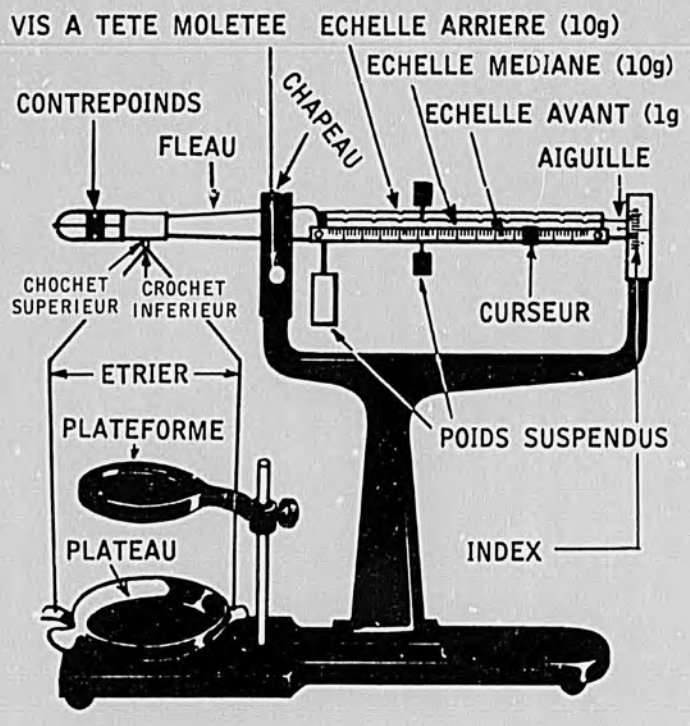


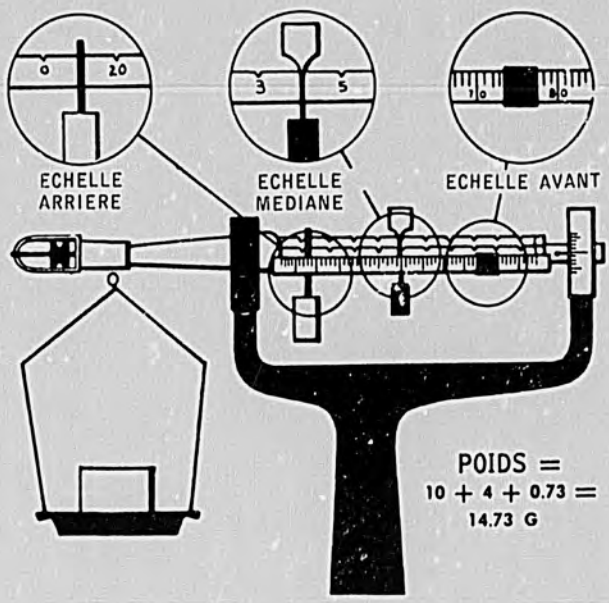
2. Enlever le poids et le remplacer par le poids immédiatement inférieur; si l'aiguille part vers la gauche, continuer par l'opération (3) ci-dessus. Si l'aiguille revient de nouveau vers la droite, remplacer le poids par le poids plus petit suivant jusqu'à ce qu'on ait trouvé celui qui ne fera pas dévier l'aiguille vers la droite.



3. Ajouter le poids juste en-dessous dans le plateau de droite et continuer comme précédemment. Répéter cette opération jusqu'à ce que l'aiguille oscille de manière équidistante de chaque côté du milieu de la graduation. Additionner les poids du plateau de droite.

UTILISATION D'UNE BALANCE A TRIPLE LEVIER GRADUE





Utilisation d'une balance à triple levier gradué

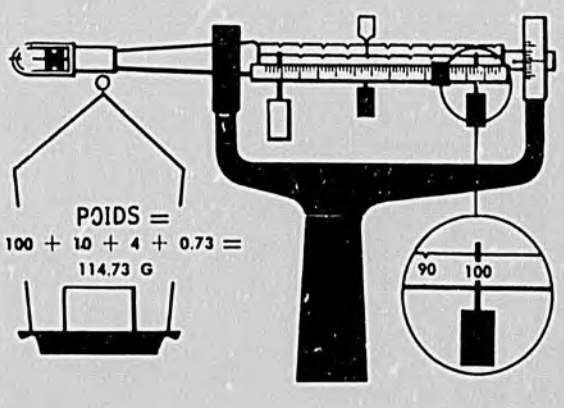
Pour installer la balance :

1. Sortir toutes les pièces de la boîte avec précaution.
2. Enlever le chapeau, placer le levier sur la colonne et remettre le chapeau.
3. Suspendre l'étrier au crochet supérieur et mettre le plateau en position.
4. Placer la balance sur une table ou un rayon solide et de niveau où il n'y a pas de vibrations.
5. Tourner la vis à tête moletée jusqu'à ce que l'arête du couteau du fléau repose sur son support et que le fléau oscille librement.
6. Placer les poids suspendus au point zéro et ajuster le contre-poids jusqu'à ce que l'aiguille oscille de manière équidistante de chaque côté du milieu de la graduation.

Pour peser des objets de moins de 100 g :

1. Placer l'objet à peser dans le plateau et déplacer le poids suspendu médian vers la droite jusqu'à atteindre le cran précédant celui où l'aiguille tombe au-dessous du milieu de l'indicateur. Chaque division de cette règlette vaut 10 g.
2. Soulever le poids suspendu arrière et le mettre en position de la même manière que celui du milieu. Chaque division de cette règlette équivaut à 1 g.
3. Glisser le curseur vers la droite à l'aide d'un crayon jusqu'à ce que l'aiguille oscille de manière équidistante de chaque côté du milieu de la graduation. Chaque petite division de cette règlette équivaut à 0,01 g.
4. Le poids total est égal à la somme des poids indiqués sur les trois règlettes.

Pour peser des objets dont le poids est compris entre 100 et 200 g



1. Suspendre le poids spécial fourni avec la balance au cran de 100 g du levier médian.
2. Continuer comme ci-dessus. Le poids de l'objet est égal à la somme indiquée par les trois poids et le curseur.

ESSAI DE TENEUR EN EAU

La teneur en eau d'un échantillon de sol est le rapport exprimé en pour cent, du poids de l'eau contenue dans l'échantillon au poids de l'échantillon séché à l'étuve.

Appareillage nécessaire

Balance à triple levier

Etuve — Spatule

Réchaud — Boîtes métalliques

Pour la détermination de la teneur en eau moyenne, les boîtes métalliques de 4 onces sont satisfaisantes, mais on peut utiliser des échantillons bien plus grands ou bien plus petits et tout récipient adéquat.

Mode opératoire

1. Peser le récipient avec l'échantillon humide à 0,01 g près et noter le poids sur une feuille d'essai.
2. Enlever le couvercle et placer le récipient dans l'étuve pour le séchage.
3. Le sortir de l'étuve, bien refermer avec le couvercle et mettre de côté pour laisser refroidir jusqu'à la température ambiante.
4. Peser le récipient avec l'échantillon séché à 0,01 g près et noter le résultat sur la feuille d'essai.
5. Si la tare n'est pas connue, nettoyer, sécher et peser le récipient avec son couvercle à 0,01 g près et noter le résultat sur la feuille d'essai.
6. Calculer la teneur en eau comme indiqué sur la feuille d'essai et le calcul donné en exemple.

Remarque : Il est recommandé que tous les récipients utilisés pour les essais de teneur en eau soient numérotés, tarés d'avance et que leurs poids soient notés.

Feuille d'essai

Essai de teneur en eau

N° de l'échantillon	TD-Fa5-3
Date	19 Juin 1945
N° de la boîte	19
Poids : échantillon humide + boîte (g)	85,55
Poids : échantillon sec + boîte (g)	76,90
Poids de l'eau (g)	8,65
Poids de la boîte (g)	41,28
Poids de l'échantillon sec (g)	35,62
Teneur en eau (%)	24,3

Exemple de calcul

Pour calculer le poids de l'eau contenue dans l'échantillon :

Poids de l'eau = (poids de l'échantillon humide + boîte) - (poids de l'échantillon sec + boîte)

= 85,55 - 76,90

= 8,65 g

Pour calculer le poids de l'échantillon sec :

Poids de l'échantillon sec

= (poids de l'échantillon sec + boîte) - (poids de la boîte)

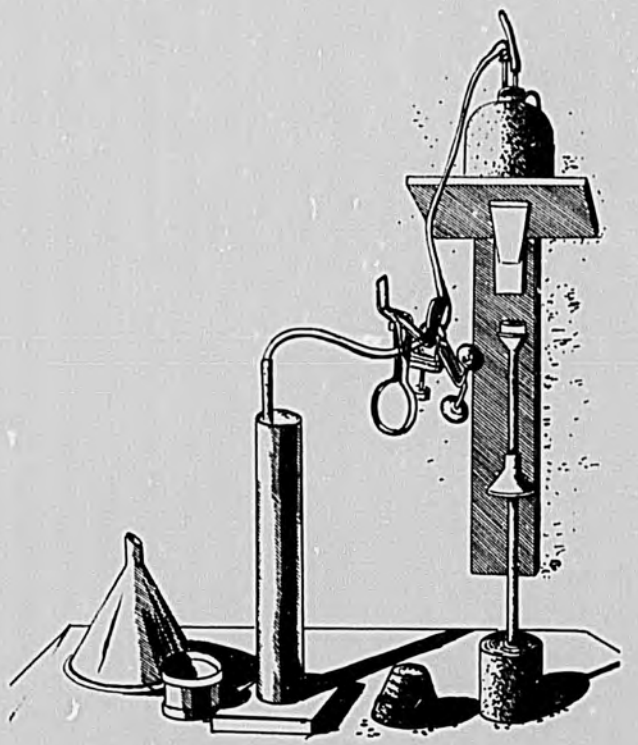
= 76,90 - 41,28 = 35,62 g

Pour calculer la teneur en eau :

$$\text{Teneur en eau} = 100 \times \frac{\text{Poids de l'eau}}{\text{Poids de l'échantillon sec}}$$

$$= 100 \times \frac{8,65}{35,62} = 100 \times 0,243 = 24,3\ \%$$

Quelques sols latéritiques subissent des changements de propriété irréversibles avec le séchage. Les sols ferrallitiques sont ceux qui sont le plus susceptibles de donner lieu à de tels changements. L'indice d'agrégation peut être utilisé pour mesurer ces changements de propriétés physiques dus à la déshydratation. Cet indice est égal à la valeur de l'équivalent de sable de l'échantillon séché à l'étuve divisé par la valeur de cet équivalent du sol dans son état naturel. Un indice d'agrégation égal à 1 indique un sol qui ne montre pas de différence ou de changement de propriété. L'essai de l'équivalent de sable mesure la proportion relative des fines d'un sol (AASHO Désignation T-176-65). Cet essai doit être effectué dans un laboratoire des sols central équipé des appareils nécessaires à cet essai.



Les changements de propriété peuvent également être déterminés en comparant les résultats de l'essai de limite de liquidité fait d'une part sur le sol séché à l'air et, d'autre part, sur le sol à sa teneur en eau naturelle.

ESSAIS DE PLASTICITE

GENERALITES

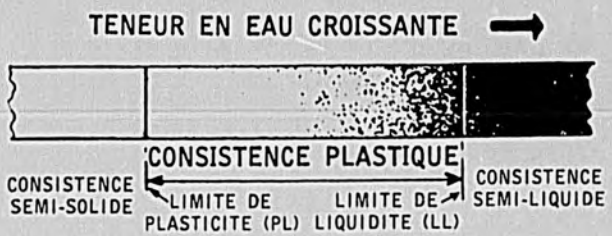
Les argiles et les sols fins analogues peuvent être amenés à une consistance semi-liquide en les malaxant avec de l'eau.

Lorsque cette teneur en eau est diminuée par l'évaporation, et que l'échantillon est de nouveau malaxé, le matériau prend une consistance analogue à celle du mastic ; on dit qu'il est plastique. Si la teneur en eau est encore diminuée, le matériau devient semi-solide et il se fissure ou tombe en morceaux lorsqu'il est déformé. L'intervalle de teneur en eau à l'intérieur duquel le matériau est d'une consistance plastique est appelé l'intervalle de plasticité.

La limite de liquidité (LL) est la teneur en eau du matériau à la limite supérieure de l'intervalle de plasticité.

La limite de plasticité (LP) est la teneur en eau du matériau à la limite inférieure de l'intervalle de plasticité.

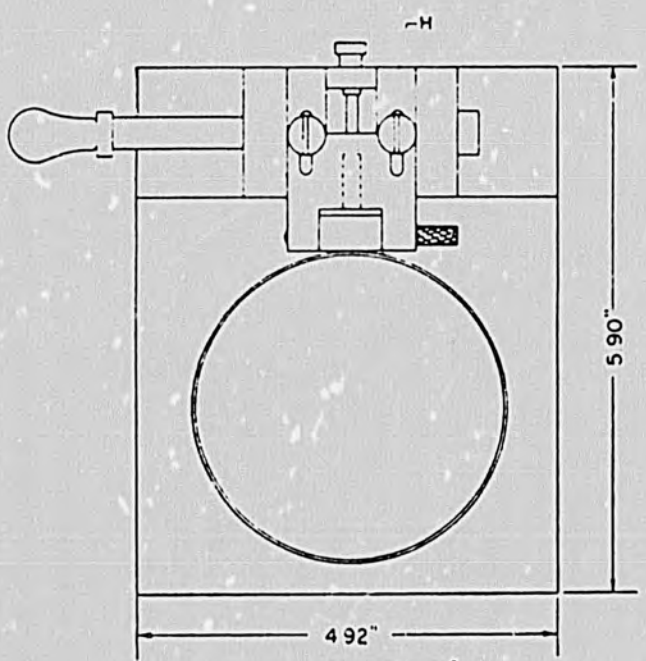
Puisqu'il n'y a pas de distinction nette entre

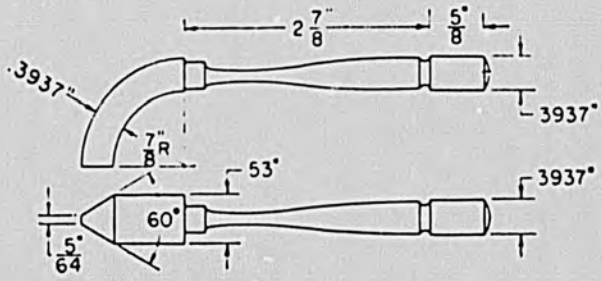


les états de consistance semi-liquide, plastique et semi-solide, les processus arbitraires pour déterminer ces limites ont été normalisés.

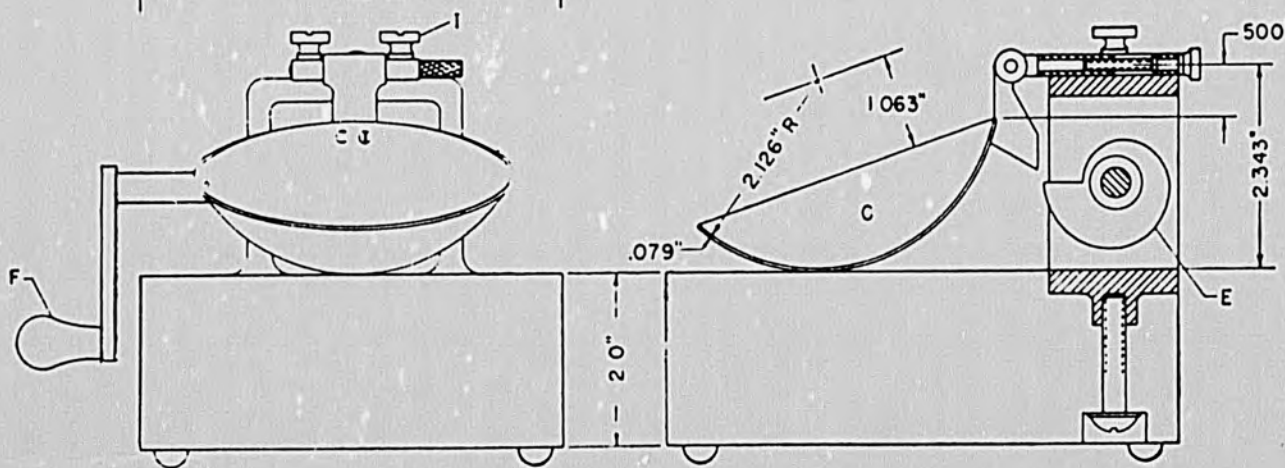
Appareillage nécessaire

Appareil de limite de liquidité	Réchaud à essence
Outil à rainurer	Tamis N° 40
Spatule	Etuve
Poire	Casserolles
Balance à triple levier	Boîtes métalliques de 4 onces
Capsules de malaxage	Pilon recouvert de caoutchouc





OUTIL A RAINURER



Réglage de l'appareil de limite de liquidité

Avant d'utiliser l'appareil de limite de liquidité, il doit être réglé de manière à ce que la chute de la coupelle dans laquelle est placé le sol soit exactement de 1 cm. Le manche de l'outil à rainurer comporte une jauge qui est utilisée pour mesurer cette distance.

1. Enlever la coupelle de l'appareil et faire une croix au crayon au centre de la tache brillante faite sur la coupelle lorsqu'elle vient frapper la base.
2. Remettre la coupelle sur l'appareil et tourner la manivelle jusqu'à ce que la coupelle soit dans la position la plus haute.
3. Insérer la jauge et vérifier la distance entre la croix marquée au crayon et la base. Libérer la vis de fixation et tourner la vis de réglage jusqu'à ce que la distance soit exactement de 1 cm.

Remarque : La jauge de 1,0 cm doit être placée entre la tache brillante et la base et non entre celle-ci et le point le plus bas de la coupelle lorsqu'on mesure la distance. Des jauges cylindriques biseautées ne peuvent pas être utilisées. Utiliser une lampe de poche ou tout autre éclairage intense derrière la jauge en vérifiant la distance.

Préparation de l'échantillon

Les essais de plasticité ne sont faits que sur la fraction de sol passant le tamis N° 40. La séparation sur le tamis N° 40 est faite soit par voie sèche, soit par la voie humide plus lente.

Les conditions sur le terrain doivent déterminer la méthode de préparation. Les résultats des essais de plasticité après les tamisages sec et humide indiqueront s'il y a des changements dus à le déshydratation.

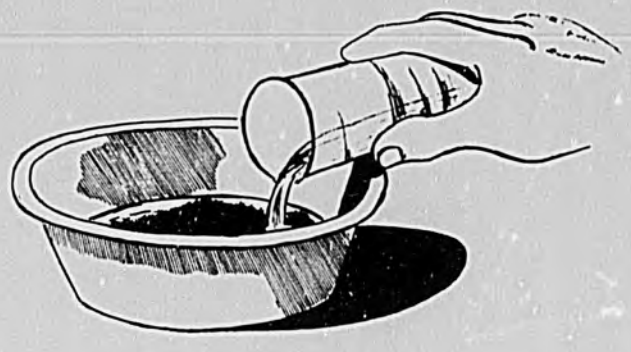
Méthode sèche.

1. Pulvériser à peu près 150 g de matériau sec avec un pilon recouvert de caoutchouc sur une surface propre et lisse.

2. Cribler l'échantillon pulvérisé sur le tamis N° 40 et jeter le refus.
3. Mélanger le tamisat avec de l'eau jusqu'à ce qu'on obtienne la consistance d'une pâte lisse et très épaisse. Couvrir avec un papier ou un chiffon humide et laisser reposer pendant au moins une heure.

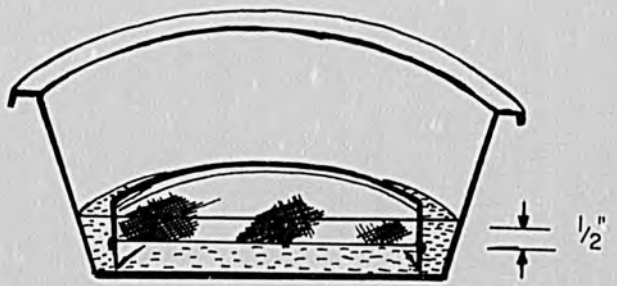
Méthode humide

1. Désagréger la quantité requise de matériau avec un pilon recouvert de caoutchouc ou avec un rouleau.



2. Verser l'échantillon dans une casserolle et le couvrir avec de l'eau. Laisser le matériau détremper jusqu'à ce qu'il soit désintégré. Ceci peut exiger de 2 à 12 heures.

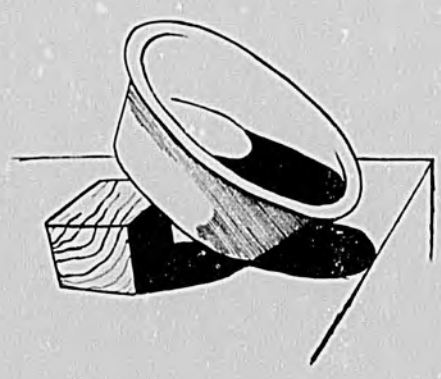
3. Placer le tamis N° 40 dans un bac et y verser tout l'échantillon détrempé. Laver tout matériau qui adhère encore à la casserolle où le matériau a été mis à détremper dans le tamis par des jets d'eau à l'aide de la poire.



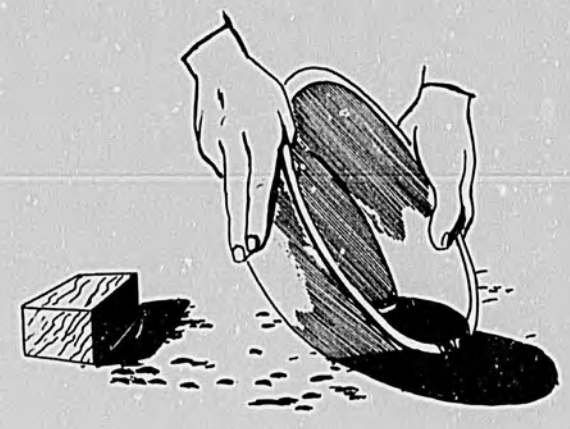
4. Verser de l'eau propre dans le bac contenant le tamis jusqu'à ce que le niveau d'eau dépasse la grille du tamis d'environ 1/2 pouce.

5. Sans soulever le tamis, l'agiter d'une seule main. En même temps, remuer le matériau de l'autre main jusqu'à ce que toutes les particules fines semblent être passées à travers le tamis.

6. Tenir le tamis légèrement au-dessus de la surface de l'eau du bac et éjecter de l'eau de la poire sur le tamis jusqu'à ce que les particules retenues et la grille soient propres. Jeter le refus.

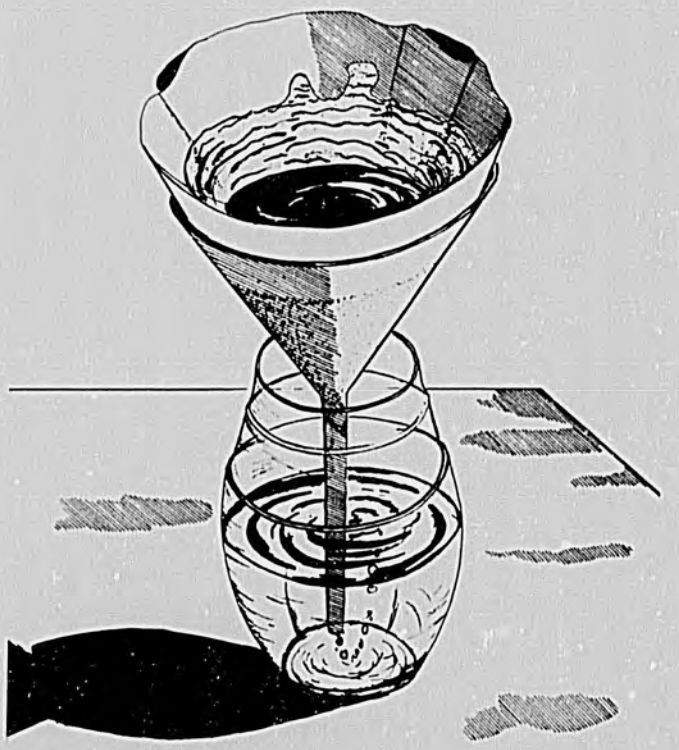


7. Placer le bac à un endroit où il ne sera pas dérangé et l'incliner sur un côté de manière à ce que l'eau atteigne presque le bord. Permettre au sol de se déposer pendant plusieurs heures.



8. Verser lentement le liquide en augmentant graduellement l'inclinaison du bac jusqu'à ce que la couche trouble au-dessus des sédiments arrive au bord.
9. Sécher le matériau à l'air jusqu'à ce qu'il prenne la consistance d'une pâte épaisse et lisse et le mettre dans une petite capsule de malaxage.

Dans le cas de la plupart des sols latéritiques, le matériau en suspension se décantera. Si après plusieurs heures il n'y a pas d'indication que cette décantation se fasse, on peut utiliser la méthode suivante :



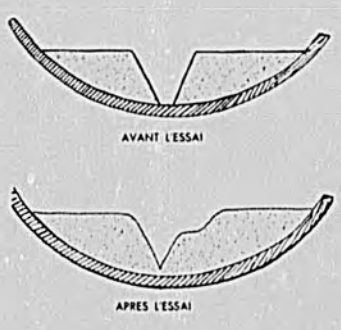
Placer un papier filtre dans un entonnoir et y mettre le sol humide comme montré sur la figure ci-dessus. Mettre l'entonnoir dans un vase ou un autre récipient et le laisser jusqu'à ce que tout l'excès d'eau soit filtré.

ESSAI DE LIMITE DE LIQUIDITE

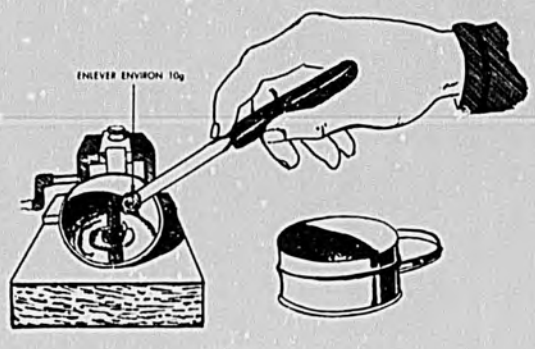
Juste avant de faire l'essai de limite de liquidité, encore bien malaxer une fois l'échantillon avec une spatule et mettre de côté à peu près une bonne cuillerée à dessert pour l'essai de limite de plasticité.

Mode opératoire

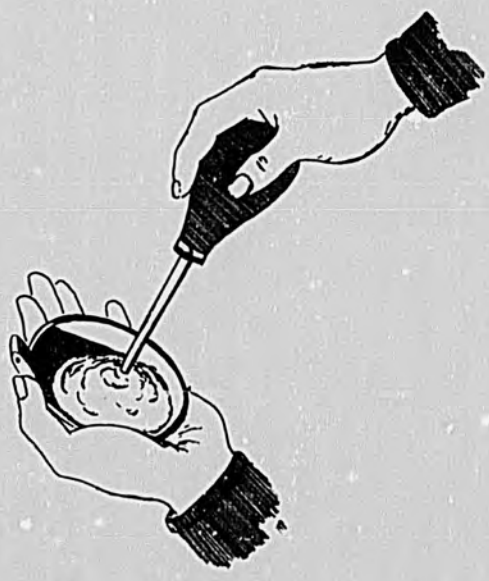
1. Mettre suffisamment de matériau de la petite capsule à l'intérieur de la coupelle en bronze de l'appareil de limite de liquidité pour la remplir d'environ d'un tiers.
2. Maintenir la coupelle presque verticale et utiliser une spatule pour mélanger et étaler le matériau afin de former un gâteau lisse, d'une épaisseur d'environ 1/2 pouce dans la moitié inférieure de la coupelle.
3. Tenir l'appareil à rainurer, les bords arrondis tournés vers le bas, avec l'index contre le côté plat.
4. Placer la pointe de l'outil au bord supérieur du gâteau de sol, l'outil étant perpendiculaire à la surface de la coupelle.
5. Tirer l'outil vers le bas à travers le centre du gâteau le long d'une ligne prolongeant la ligne médiane du levier de la coupelle. Incliner en même temps l'outil pour qu'il reste perpendiculaire au fond de la coupelle.
6. Avant de le mettre de côté, nettoyer l'outil à rainurer en glissant le pouce le long du tranchant. Si le sol sèche sur l'outil, on perd du temps à le nettoyer par la suite.
7. Les parties de l'appareil de limite de liquidité où se produisent les chocs étant propres et sèches, et la hauteur de chute étant proprement ajustée, placer la coupelle sur l'appareil, tourner la manivelle à la vitesse d'environ deux tours par seconde et compter le nombre de chocs nécessaires pour que le fond de la rainure se ferme sur une distance de 1/2 pouce environ.



Remarque : Si la rainure n'est pas fermée sur 1/2 pouce en 25 à 35 chocs, ajouter de l'eau et retravailler ou sécher l'échantillon pour qu'il prenne une consistance de cet ordre.



8. Enlever la coupelle de l'appareil, malaxer et rainurer à nouveau l'échantillon et répéter l'opération N° 7. Si le deuxième essai donne le même nombre de chocs que le premier ou ne diffère de celui-ci que d'un seul choc, noter les deux nombres sur la feuille d'essai.
   Si la différence est de plus de un choc, répéter l'essai jusqu'à ce que trois résultats consécutifs donnent une suite raisonnablement cohérente comme 30 - 32 - 30 ou 30-28 - 30 - (suites typiques dans une atmosphère humide) ou 30 - 32 - 34 (suite typique dans une atmosphère sèche).
9. Enlever environ 10 g de matériau de la partie refermée de la rainure. Placer le matériau dans une petite boîte métallique et la fermer hermétiquement.



10. Enlever la coupelle de l'appareil, malaxer et rainurer

à nouveau l'échantillon et répéter les opérations 7, 8 et 9.

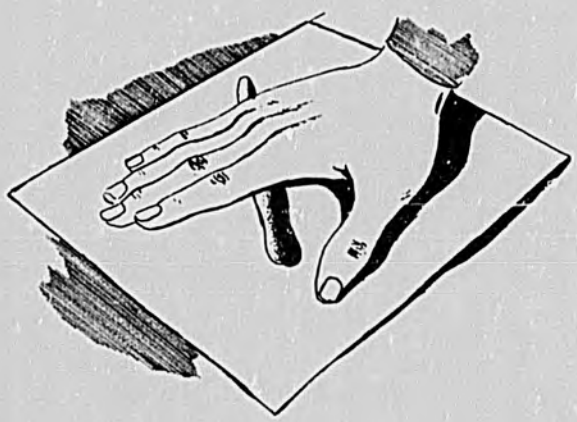
11. Placer environ 20 g du matériau de la capsule de malaxage dans la coupelle de limite de liquidité. Ajouter une faible quantité d'eau et mélanger pour obtenir une pâte uniforme ayant une consistance correspondant à un nombre de chocs de fermeture compris entre 10 et 20.
12. Rainurer l'échantillon et répéter les opérations 7, 8, 9 et 10.
13. Déterminer la teneur en eau de tous les échantillons obtenus au cours de l'essai. (Les boîtes doivent être convenablement numérotées et enregistrées).
14. Déterminer la limite de liquidité de l'échantillon humide, sécher l'échantillon à l'air et effectuer la détermination du nombre de chocs à des teneurs en eau différentes au fur et à mesure que le sol sèche.

ESSAI DE LIMITE DE PLASTICITE

La petite fraction de l'échantillon qui a été mise de côté au début de l'essai de limite de liquidité, est laissée à sécher jusqu'à ce qu'elle ait une consistance telle que le matériau ne colle pas aux mains, mais qu'il puisse, cependant, encore être roulé en fuseau sans se morceler.

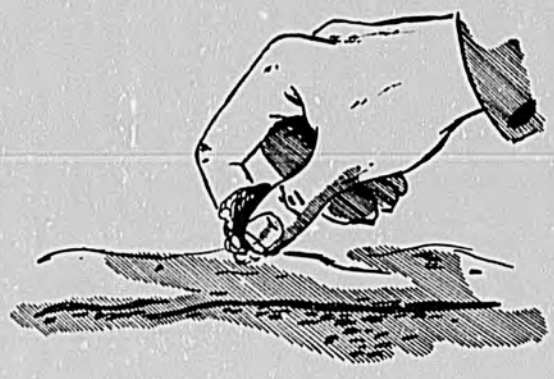
Mode opératoire

1. Prendre à peu près la moitié, mais pas plus, de cette partie d'échantillon et la rouler avec la paume de la main sur une surface propre et lisse quelconque, une

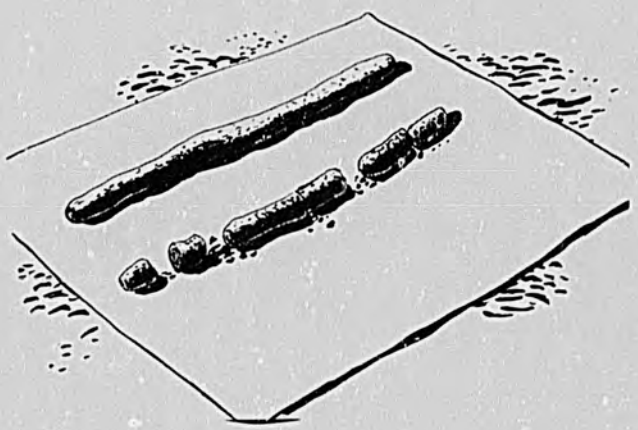


feuille de papier par exemple, pour former un fuseau d'un diamètre de 1/8 de pouce et d'une longueur d'environ 3 pouces.

2. Replier le fuseau et le presser pour en faire une seule masse qu'on roule de nouveau.
3. Répéter l'opération 2 ; la teneur en eau diminuant progressivement par évaporation au fur et à mesure que l'échantillon est manipulé, les fuseaux deviennent plus fermes.



4. La limite de plasticité (LP) est atteinte lorsque le fuseau tombe en un certain nombre de morceaux lorsqu'il est roulé.



Remarque : S'il y a le moindre doute sur le fait que la LP soit atteinte, malaxer les morceaux pour en faire une boule et la rouler de nouveau.

5. Placer immédiatement le fuseau morcelé dans une petite boîte métallique et déterminer sa teneur en eau.
6. Faire une autre détermination de la LP à titre de vérification en utilisant le restant de l'échantillon de départ.

Feuille d'essai

La même feuille d'essai est utilisée à la fois pour les essais de limite de plasticité et de limite de liquidité.

INDICE DE PLASTICITE

La différence entre les teneurs en eau de la limite de liquidité (LL) et de la limite de plasticité (LP) est l'indice de plasticité (IP) : IP = LL - LP

par exemple : LL = 38 LP = 22

IP = 38 - 22 = 16

FEUILLE D'ESSAI

ESSAI DE PLASTICITE

Initiales SDV Date 19 Juin 45

Echantillon N°	TD - Fr 3 - 2					
Type d'essai	LL	LL	LL	LL	PL	PL
N° de la boîte	3	7	1	4	5	8
Nombre de chocs	31-29-29	30-31	16-15	16-17	—	—
Poids de l'échantillon humide + boîte, g	48,65	43,85	40,97	44,96	34,64	37,11
Poids de l'échantillon sec + boîte, g	43,97	40,60	38,23	41,36	34,15	36,13
Poids de l'eau, g	4,68	3,25	2,74	3,60	0,49	0,98
Poids de la boîte, g	31,28	31,76	31,40	31,92	31,58	31,71
Poids de l'échantillon sec, g	12,69	8,84	6,83	9,44	2,27	4,42
Teneur en eau, %	36,9	37,1	40,1	38,1	21,6	22,2

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Poids initial de l'échantillon 431 g
Poids après lavage préalable 411 g
Perte au lavage 20 g

N° de l'échantillon TD-Fr3-2
Initiales SDV
Date 19 Juin 1945

TAMIS ou GRILLE	MAILLE DU TAMIS mm	POIDS DU REFUS PARTIEL, g	POIDS DU TAMISAT	
			g	%
2 pouces	50,8			
1 pouce 1/2	38,1			
1 pouce	25,4	0	431	100,0
3/4 pouce	19,1	20	411	95,4
1/4 pouce	6,35			
N° 4	4,75	122+4 = 126	285	66,1
N° 10	2,00	121	164	38,1
N° 40	0,42	86	78	18,1
N° 60	0,25			
N° 100	0,149	37	41	9,5
N° 200	0,074	15	26	6,0
Recueilli dans le fond		6		
Perte au lavage		20		
Poids total		26		
TOTAL		427		

Remarques : Erreur = 431 - 427 = 4g (ajouté au refus du tamis N° 4). Grain le plus gros = 1 pouce.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

La détermination de la courbe de répartition des grains d'un sol suivant leur dimensions, appelée analyse granulométrique, est faite par un procédé de criblage (analyse sur tamis) pour les sols à gros grains et par un procédé de sédimentation dans l'eau (sédimentométrie) pour les sols à grains fins. Lorsque les deux procédés sont utilisés sur le même échantillon, l'essai est appelé analyse granulométrique combinée.

Tamisage sous l'eau

A cause de la tendance de certains sols latéritiques à former des agrégations, le tamisage de l'échantillon doit être effectué après que les fines aient été enlevées par un lavage.

Appareillage nécessaire

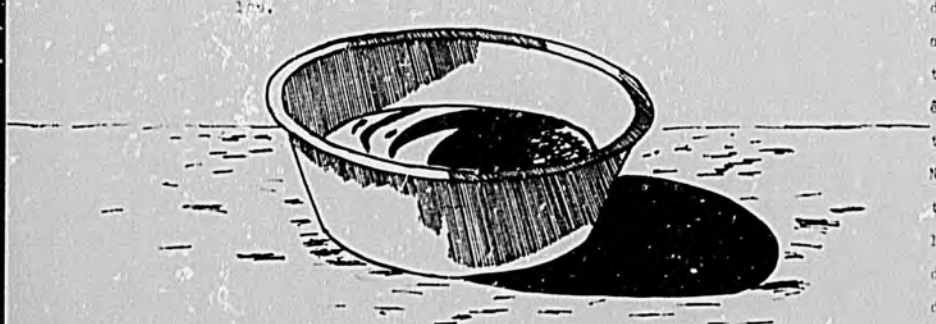
Balance de torsion	Casserolles
Ensemble de tamis	Etuve
Ensemble de grilles portatives	Balance à triple levier gradué
Pinceau	

Préparation pour l'essai de granulométrie

1. Deux échantillons doivent être sélectionnés par la méthode du quartage ou à l'aide d'un échantillonneur, un pour l'essai granulométrique et l'autre pour la détermination de la teneur en eau.
2. L'échantillon pour la granulométrie ne doit pas peser moins dans son état naturel que les quantités indiquées dans le tableau suivant.

Dimension nominale du tamis maximum	Poids minimum approximatif de l'échantillon en kg
N° 4	1,0
1/2 pouce	2,0
3/4 pouce	3,0
1 pouce	4,0
1 pouce 1/2 ou + grand	5,0

3. L'échantillon pour la détermination de la teneur en eau doit peser au moins 30% de celui utilisé pour la granulométrie.
4. Peser l'échantillon pour la granulométrie dans son état humide et le placer dans un récipient. Ajouter suffisamment d'eau dans le récipient pour recouvrir l'échantillon.

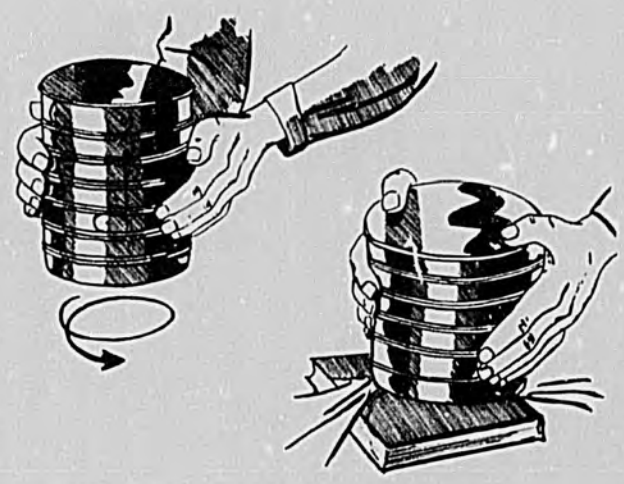


5. Préparer un ensemble de deux tamis dont l'un, le N° 200, est en bas et l'autre, le N° 10, est au-dessus.
6. Transférer l'échantillon sur les deux tamis emboîtés et laver à l'eau courante. Si l'échantillon est trop volumineux pour être traité en une seule fois sur le tamis, en laver une portion et le mettre dans le récipient dans lequel il va être séché.

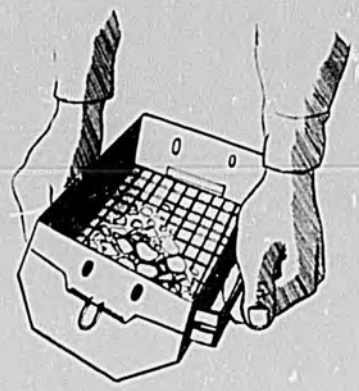
Remarque : Le fait de tapoter le tamis accélère l'opération de lavage.

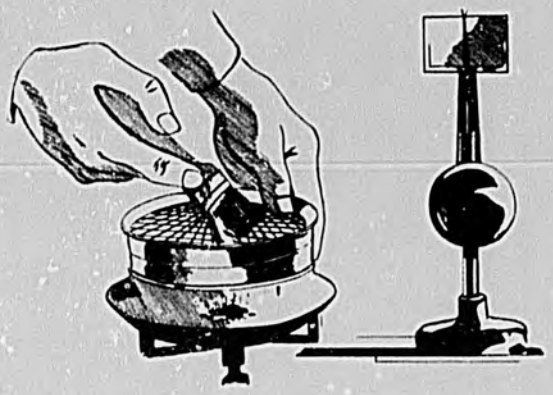
7. Mélanger les matériaux lavés retenus sur l'ensemble des deux tamis N° 10 et N° 200 et les sécher à une température ne dépassant pas 230° F (110° C) jusqu'à poids constant.

Remarque : le poids sec qui doit être utilisé dans les calculs de la granulométrie doit être déterminé en utilisant le poids humide initial et la teneur en eau de l'échantillon.

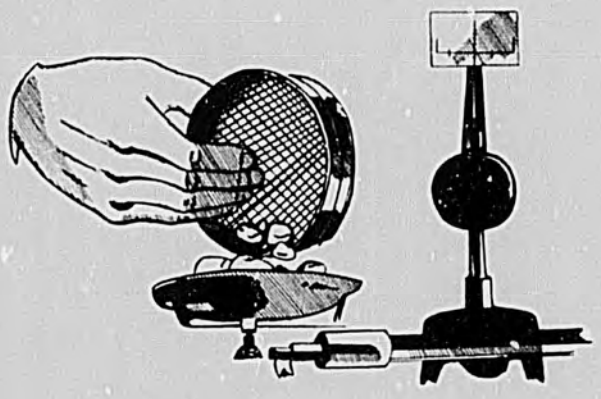


8. Transférer l'échantillon sec à une colonne de tamis emboîtés (ouverture croissante des mailles des tamis de bas en haut) munie d'un fond. Mettre le couvercle et agiter la colonne vigoureusement d'un mouvement de rotation horizontale. Les tamis peuvent occasionnellement être heurtés les uns contre les autres en les laissant tomber légèrement sur plusieurs épaisseurs de magazines. Ne pas laisser tomber directement sur l'établi ou la table ; ceci endommagerait les tamis. Le temps pendant lequel il faut secouer les tamis dépend de la quantité de fines de l'échantillon, mais il ne devrait pas être de moins de 15 minutes pour la plupart des sols à grains fins.





Remarque : Les gros échantillons contenant beaucoup de pierres grossières doivent d'abord être criblés sur l'ensemble de grilles portatives. Le nombre et la dimension des grilles et des tamis à utiliser dépendent du type de sol soumis aux essais et du but de l'essai. On peut souvent se permettre d'omettre quelques tamis de dimensions intermédiaires comme l'illustre l'exemple donné sur la feuille d'essai.



9. Transférer le matériau du tamis le plus grand au plateau de la balance de torsion et peser à 5 g près. Noter la dimension des grains les plus gros. Placer le matériau dans un récipient et le garder jusqu'à ce que l'essai soit terminé.

Remarque : Pour les échantillons de moins de 50g, peser chaque fraction sur la balance à triple levier au gramme près.

10. Répéter l'opération successivement pour chaque tamis de dimension inférieure. Les pierres isolées coincées dans les mailles ne doivent pas être forcées à travers les grilles, mais doivent être enlevées à la main et ajoutées à la fraction avant la pesée. Les tamis plus fins doivent être renversés sur le plateau de la balance et être brossés jusqu'à ce qu'ils soient propres.

Exemple de calcul

1. Faire la somme des poids retenus sur chaque tamis : la comparer au poids initial de l'échantillon sec. Si l'erreur dépasse 3%, peser de nouveau chaque fraction ou répéter l'essai.
2. Si l'erreur est inférieure à 3%, corriger d'une valeur égale à cette erreur le poids de la fraction des grains les plus gros.
3. Calculer le poids du matériau passant à travers chaque tamis. Par exemple :

   Poids passant le tamis N° 4

   = (poids initial de l'échantillon) -(poids du matériau retenu sur la tamis N° 4 et sur tous les tamis plus grands)

   = 431 - (20 + 126) = 431 - 146 = 285
4. Calculer le pourcentage pondéral du matériau passant chaque tamis. Par exemple :

$$100 \times \frac{\text{poids passant le tamis N° 4}}{\text{poids initial de l'échantillon}} =$$

$$100 \times \frac{285}{431} = 66{,}1\ \%$$

Courbe granulométrique

Tracer la courbe granulométrique sur du papier semi-logarithmique comme montré sur la Figure. Puisqu'il faut souvent quatre modules au moins pour tracer la courbe, deux feuilles de papier à trois modules fournies avec l'équipement du laboratoire peuvent être collées ensemble.

SEDIMENTOMETRIE

Les caractéristiques physiques d'un sol à grains fins sont en général identifiées avec une précision meilleure par les essais de plasticité que par leur répartition granulométrique. Une analyse par sédimentométrie est cependant nécessaire pour déterminer le pourcentage du matériau inférieur à 0,02 mm de diamètre. L'appareillage de laboratoire nécessaire à l'analyse granulométrique des grains inférieurs à 0,07 mm de diamètre (passant le tamis N° 200) n'est pas compris dans l'équipement standard.

Appareillage nécessaire

Appareils de l'équipement standard

Balance à triple levier — Réchaud à essence

Spatule — Boîtes métalliques

Etuve — Chronomètre

Eprouvette graduée de 100 cc

Appareils improvisés

Pilon recouvert de caoutchouc

Cylindre de sédimentation (voir ci-dessous)

Défloculation de la solution

Préparer une solution dans les proportions de 1 g d'agent dispersif pour 20 cc d'eau. Les agents appropriés généralement disponibles sont :

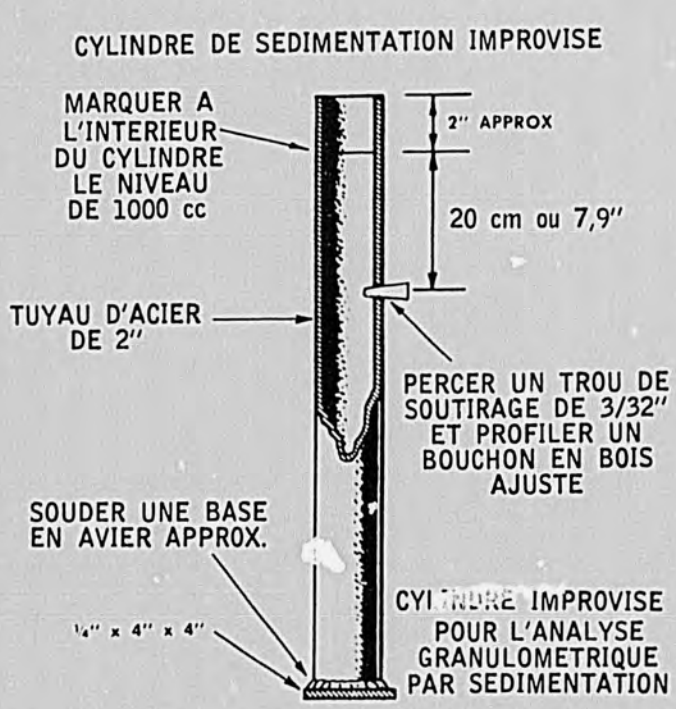
la gomme arabique

le bicarbonate de soude (bicarbonate de cuisine)

le silicate de sodium (verre soluble)

l'hexamétaphosphate de sodium (recommandé pour les sols latéritiques)

Cylindre de sédimentation improvisé



Le cylindre de sédimentation peut être improvisé à partir d'un tronçon de tuyau d'acier de 2 pouces de diamètre et d'une longueur d'environ 24 pouces ou à partir de tout autre cylindre ayant à peu près le même diamètre comme le fourreau de la dame de compactage. Le fermer ou mettre un bouchon à un bout et ajouter 1000 cc d'eau. Marquer le niveau d'eau à l'intérieur du cylindre. Mesurer 20 cm (7,9 pouces) vers le bas à partir de cette marque et percer un trou de 3/32e de pouce à cet endroit. Découper un bouchon en bois ou en liège adapté à ce trou. Nettoyer le cylindre avec de l'eau savonneuse chaude avant de l'utiliser.

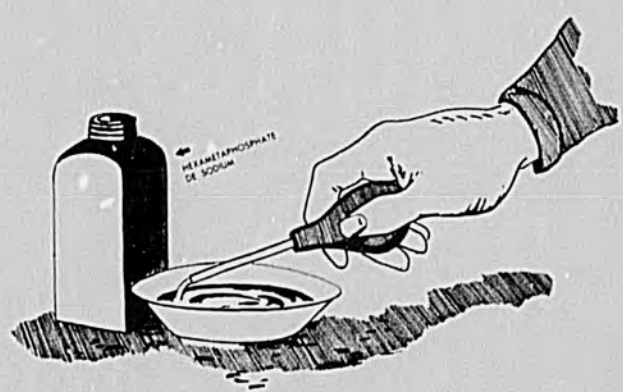
Importance de l'échantillon

L'analyse par sédimentométrie est faite sur des échantillons dont la plus grande partie des matériaux passe le tamis N° 40. (Pour les sols à gros grains voir l'analyse granulométrique combinée). L'importance de l'échantillon doit être proportionnelle à la teneur en sable du sol. Prendre de 30 à 50 g (poids sec) pour des argiles et des limons et entre 50 à 150 g (poids sec) pour des sols sableux.

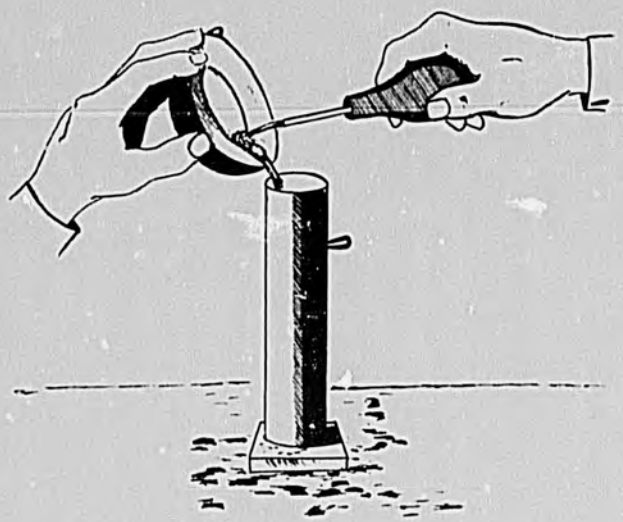
Procédure pour déterminer la fraction de 0,02 mm

1. La portion de l'échantillon passant le tamis N° 10 doit être ou séchée à l'air, ou être à la teneur en eau naturelle in-situ (la préparation de l'échantillon est la même que celle du sol humide pour l'essai de limite de liquidité). Le poids sec qui doit être utilisé dans les calculs de l'analyse sédimentométrique doit être calculé en utilisant le poids humide initial et la teneur en eau soit de l'échantillon séché à l'air, soit de l'échantillon à la teneur en eau in-situ.

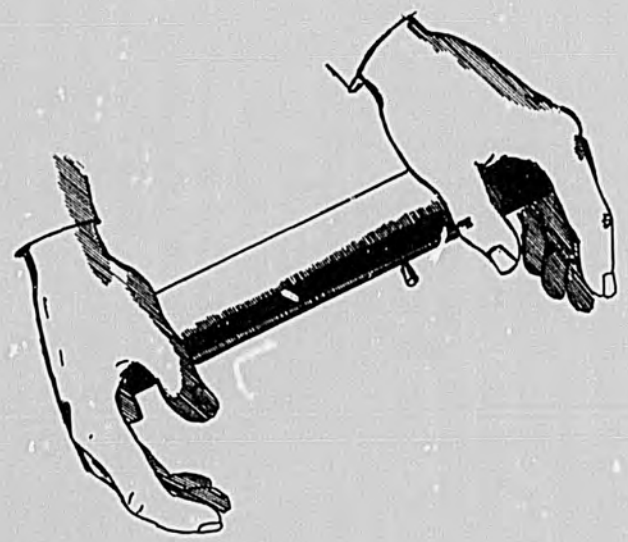
2. Pulvériser l'échantillon séché à l'air avec un pilon recouvert de caoutchouc et le mettre dans une coupelle. Prendre soin de ne pas casser les grains.



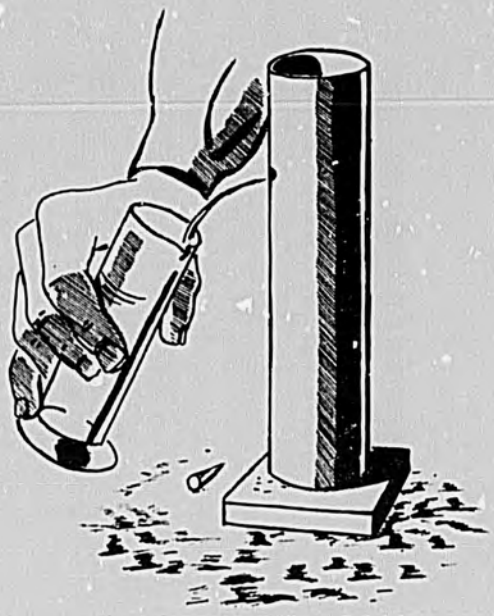
3. Placer le sol pulvérisé séché à l'air ou le sol humide dans un plateau et mélanger l'échantillon avec suffisamment d'eau pour en faire un coulis fluide, ajouter 20 cm^3 de solution défloculante et laisser macérer jusqu'à désintégration complète. Le temps de macération doit augmenter avec la plasticité et la résistance à sec de l'échantillon. Donner deux heures à des sols non plastiques et jusqu'à douze heures à des argiles très plastiques ayant une résistance à sec élevée.



4. Tranaférer le coulis au cylindre de sédimentation en prenant soin de laver toutes les fines du plateau à l'aide du jet de la poire. Ajouter de l'eau jusqu'à la marque de 1000 cc.



5. Secouer vigoureusement le cylindre pendant une minute. Utiliser la paume de la main gauche comme bouchon et renverser complètement le cylindre de bout en bout.
6. Placer le cylindre sur une base ferme dans un coin protégé du laboratoire où il n'est pas exposé aux rayons directs du soleil ou à toute autre source unilatérale de chaleur.
7. Après une durée de 9 minutes (voir le tableau) enlever le bouchon du trou de soutirage et recueillir 100 cc de la suspension dans un flacon gradué.
8. Verser les 100 cc de suspension dans une boîte métallique ou dans un plateau qu'on place dans l'étuve pour évaporer l'eau.
9. Peser le résidu séché à l'étuve à 0,01 g près.



10. Calculer le pourcentage des grains inférieurs à 0,02 mm comme montré ci-dessous :

% passant le tamis N° 10 = 85% = 0,85
poids de l'échantillon initial = 36,82 g
poids du résidu (de 100 cc) = 1,73 g
pourcentage plus petit que 0,02 mm =

$$1000 \times \frac{\text{poids du résidu}}{\text{poids de l'échantillon initial}} =$$

$$1000 \times \frac{1,73}{36,82} = 47,0 \times 0,85 = 40,0\%$$

Facteurs de correction

La procédure ci-dessus est correcte pour des conditions moyennes (densité de 2,68, température de l'eau de 68° F). Des variations mineures à partir des conditions moyennes n'affectent que peu la précision des résultats de l'essai et peuvent être négligées. Des variations importantes soit de la température de l'eau, soit de la densité, doivent être corrigées par des variations correspondantes de la durée de temps en minutes avant le soutirage (opération 7) comme indiqué ci-dessous.

TEMPERATURE DE L'EAU (°F)	DUREE (MINUTES) DENSITE				
	2,00 à 2,19	2,20 à 2,39	2,40 à 2,69	2,70 à 2,89	3,00 à 3,19
40-49	19	16	13	11	10
50-59	16	14	11	9	8
60-69	14	12	9	8	7
70-79	12	10	8	7	6
80-89	10	9	8	6	5
90-99	9	8	7	6	5

Procédure pour déterminer les fractions des grains d'autres dimensions

Pour obtenir toute la courbe granulométrique d'un sol à grains fins, il faut déterminer plusieurs points de la courbe par sédimentométrie. Trois points, correspondants aux dimensions de 0,05 , 0,02 et 0,005 mm, sont en général suffisants pour tracer la partie de la courbe granulométrique dans cet intervalle. L'équipement improvisé peut être utilisé en préparant une suspension différente pour chaque point qu'on souhaite obtenir par la méthode décrite ci-dessus, en soutirant 100 cc de la suspension après une durée de temps déterminée à partir du graphique de l'analyse sédimentométrique. Le pourcentage du matériau plus petit que chaque dimension sélectionnée est ensuite calculé comme ci-dessus.

Utilisation du graphique de l'analyse sédimentométrique

La durée avant soutirage, relative diverses densités et températures de la suspension pour la détermination du pourcentage d'une dimension de grains quelconque, peut être obtenue à l'aide du graphique de l'analyse sédimentométrique montré sur la page ci-contre.

Exemple N° 1

Obtention de la durée pour déterminer le pourcentage des grains plus petits que 0,010 mm dans des conditions moyennes. La ligne des conditions moyennes coupe la ligne de 0,010 mm à peu près au milieu des ordonées de 30 et de 40 minutes ; la durée est donc de 35 minutes.

Exemple N°2

Obtention de la durée pour déterminer le pourcentage des grains plus petits que 0,02 mm, la densité du sol étant de 2,95 et la température dans la chambre de suspension de 100° F.

1. Prolonger la ligne passant par le point 2,95 sur l'échelle de densité et le point 100° F sur l'échelle de température jusqu'au bord du quadrillage.
2. Tracer à partir de cette intersection avec le bord du quadrillage une ligne parallèle à la ligne droite des conditions moyennes.
3. L'intersection de la verticale de 0,02 mm avec cette ligne tombe au milieu des ordonées de 5 et 6 minutes : il faut donc une durée de 5 minutes 1/2.

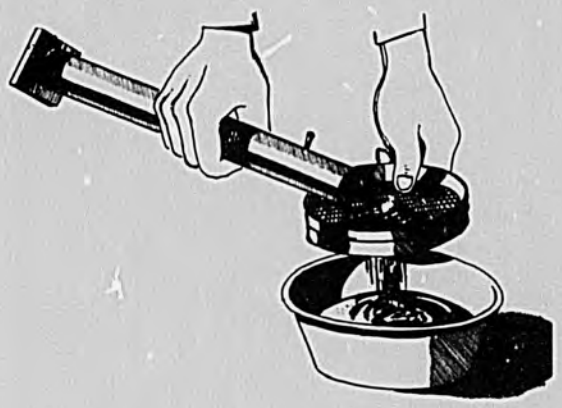
ANALYSE GRANULOMETRIQUE COMBINEE

Importance de l'échantillon

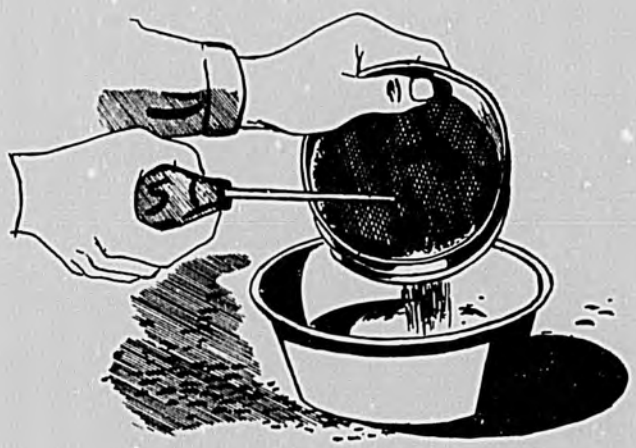
Pour les sols contenant peu de grains plus grands que 1/4 de pouce utiliser environ 200 g de matériau sec. Pour des sols graveleux, utiliser un échantillon d'environ 200 g de matériau sec passant le tamis de 1/4 de pouce.

Mode opératoire

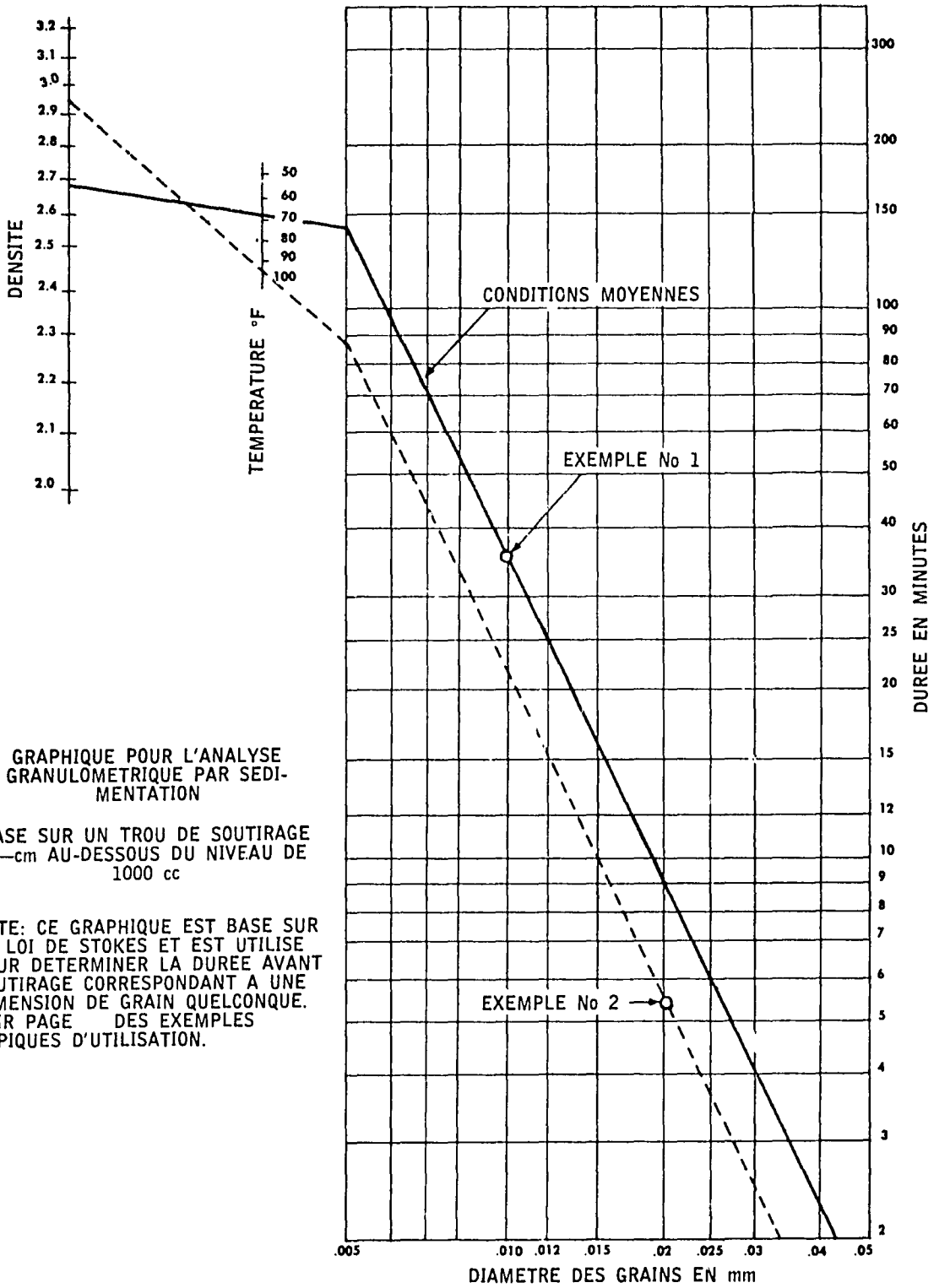
1. Déterminer le poids sec comme sur la page 27 .
2. Enlever à la main les grains d'un diamètre supérieur à 1/4 de pouce et les placer dans un plateau contenant à peu près 500 cc d'eau et 20 cc de solution défloculante.
3. Laver soigneusement ces grains pour enlever toutes les fines adhérant à leur surface et les mettre de côté dans un récipient.
4. Pulvériser la partie fine de l'échantillon. La placer dans l'eau contenant l'agent dispersif et dans laquelle les pierres furent lavées et mélanger à fond.
5. Continuer l'analyse sédimentométrique comme ci-dessus (opération 4, page 37), à la différence près que le matériau dans le cylindre de sédimentation n'est pas jeté après le soutirage de l'échantillon de 100 cc.



6. Après avoir terminé l'analyse sédimentométrique, secouer vigoureusement le cylindre et verser la solution sur le tamis N° 200. Rincer le cylindre pour faire passer tous les grains de sol restants sur le tamis.



7. Laver soigneusement le matériau dans le tamis sous un jet d'eau pour enlever toutes les fines ; celles-ci peuvent être jetées.
   Placer le tamis avec les matériaux retenus dans l'étuve pour les sécher. Placer également le récipient avec les pierres enlevées au début de l'essai dans l'étuve.
8. Renverser le tamis sur un morceau de papier propre et nettoyer le tamis en le brossant et en le tapotant. Ajouter les pierres et faire l'analyse au tamis sur ce matériau combiné (page 26)



GRAPHIQUE POUR L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTATION

BASE SUR UN TROU DE SOUTIRAGE 2—cm AU-DESSOUS DU NIVEAU DE 1000 cc

NOTE: CE GRAPHIQUE EST BASE SUR LA LOI DE STOKES ET EST UTILISE POUR DETERMINER LA DUREE AVANT SOUTIRAGE CORRESPONDANT A UNE DIMENSION DE GRAIN QUELCONQUE. VOIR PAGE DES EXEMPLES TYPIQUES D'UTILISATION.

Exemple de calcul

Poids sec calculé de l'échantillon initial = 431g

Poids du résidu (de 1000cc après 4 minutes) = 1,26g

Pourcentage des grains inférieurs à 0,02mm

$= 1000 \times \frac{\text{poids du résidu}}{\text{poids initial de l'échantillon}}$

$= 1000 \times \frac{1,26}{431} = 2,9\ \%$

Les calculs d'analyse granulométrique sont basés sur le poids sec initial de l'échantillon (431g) et sont faits comme montré à la page 26.

DETERMINATION DU POIDS SPECIFIQUE APPARENT

Utilisation

La détermination du poids spécifique apparent (également appelée essai de poids volumétrique) est utilisée pour contrôler le compactage des remblais et des couches de base.

Définitions

Le poids spécifique à l'état humide ou densité humide est le poids par pied cube du matériau humide en place. Le poids spécifique à l'état sec ou densité sèche est le poids des grains solides par pied cube du matériau en place.

POIDS SPECIFIQUE DU SOL EN PLACE PAR LA METHODE DU CONE DE SABLE

Appareillage

1. L'appareil se compose d'une bouteille de un gallon et d'un système constitué d'un robinet à boisseau avec un orifice et ayant un petit entonnoir d'un côté et un grand entonnoir de l'autre.
2. Sable. Un sable propre, sec, coulant librement, ayant peu ou pas de grains passant le tamis N° 200 ou retenus sur le tamis N° 10.
3. Une bascule d'une précision de 1 g et une balance d'une précision de 0,1 g.
4. Etuve ou réchaud pour sécher les échantillons en vue de la détermination de la teneur en eau.
5. Une petite pioche, des burins ou des cuillers pour creuser le trou d'essai ; des plateaux pour sécher les échantillons de teneur en eau et des boîtes avec couvercle.

Mode opératoire

1. Déterminer la contenance de la bouteille de l'appareil jusqu'à l'orifice y compris le volume même de l'orifice.
   a) Peser l'appareil assemblé.
   b) Mettre l'appareil debout et ouvrir le robinet.
   c) Remplir l'appareil d'eau jusqu'à ce qu'elle apparaisse au-dessus du robinet.
   d) Fermer le robinet et enlever l'eau en excès.
   e) Peser l'appareil avec l'eau et déterminer la température de l'eau.
   f) Répéter ceci au moins deux fois. Déduire du poids de l'eau en grammes le volume en millilitres en faisant la correction de température.
2. Déterminer la densité apparente du sable qui sera utilisé dans l'essai in-situ comme suit :
   a) Placer l'appareil à l'endroit sur une surface ferme et de niveau ; fermer le robinet et remplir l'entonnoir de sable.
   b) Ouvrir le robinet et en gardant l'entonnoir au moins rempli de sable à moitié, remplir l'appareil. Fermer le robinet brusquement et enlever l'excès de sable.
   c) Peser l'appareil avec le sable et déterminer le poids net de sable en soustrayant le poids de l'appareil.
3. Déterminer le poids de sable nécessaire pour remplir l'entonnoir :
   a) Mettre du sable dans l'appareil et peser l'appareil avec le sable.
   b) Placer l'appareil renversé sur une surface propre et horizontale.
   c) Ouvrir le robinet et le laisser ouvert jusqu'à ce que le sable s'arrête de couler.
   d) Fermer le robinet rapidement, peser l'appareil avec le sable restant et déterminer la perte de sable. Cette perte représente le poids de sable nécessaire pour remplir l'entonnoir.
4. Déterminer la densité du sol en place comme suit :
   a) Préparer la surface du sol soumis aux essais de manière à ce qu'elle soit de niveau.
   b) Placer le cône de sable renversé sur la surface du sol et marquer le contour de l'entonnoir.
   c) Creuser le trou d'essai à l'intérieur du périmètre de l'entonnoir. Placer tout le sol dégagé dans un récipient en prenant soin d'éviter de perdre une partie du matériau.
   d) Placer l'appareil dans la position marquée précédemment, ouvrir le robinet et après que le sable ne soit arrêté de couler, fermer le robinet.
   e) Peser l'appareil avec le sable restant et déterminer le poids de sable utilisé dans l'essai.
   f) Peser le matériau qui a été enlevé du trou d'essai.
   g) Mélanger le matériau avec soin, garder et peser un échantillon représentatif pour la détermination de la teneur en eau.
   h) Sécher et peser l'échantillon gardé pour la teneur en eau.

CALCULS

1. Calculer le volume de l'appareil de densité comme suit:

$$V_1 = GT$$

où :

V_1 = volume en ml de l'appareil de densité

G = poids en g de l'eau nécessaire pour remplir l'appareil

T = correction de température pour le volume montré dans la colonne 3 du Tableau 1

TABLEAU 1 - Volume d'eau par gramme en fonction de la température

Température		Volume d'eau
°C	°F	ml / g
12	53,6	1,00048
14	57,2	1,00073
16	60,8	1,00103
18	64,4	1,00138
20	68,0	1,00177
22	71,6	1,00221
24	75,2	1,00268
26	78,8	1,00320
28	82,4	1,00375
30	86,0	1,00435
32	89,6	1,00497

2. Calculer le poids spécifique apparent du sable comme suit :

$$W_1 = \frac{62,427\ W_2}{V_1}$$

où :

W_1 = poids spécifique apparent du sable en livres par pied cube

W_2 = poids en g du sable nécessaire pour remplir l'appareil

V_1 = volume de l'appareil en ml (paragraphe a)

3. Calculer la teneur en eau et le poids du matériau sec enlevé du trou d'essai comme suit :

$$w = \frac{W_3 - W_4}{W_4} \times 100$$

$$W_6 = \frac{0,2205\ W_5}{w + 100}$$

où :

w = pourcentage d'eau du matériau du trou d'essai

W_3 = poids humide en g de l'échantillon de teneur en eau

W_4 = poids sec en g de l'échantillon de teneur en eau

W_5 = poids humide en g du matériau du trou d'essai

W_6 = poids sec en g du matériau du trou d'essai.

4. Calculer la densité sèche en place du matériau soumis aux essais comme suit :

$$V = \frac{W_7 - W_8}{453,6\ W_1}$$

$$w = \frac{W_6}{V}$$

où :

V = volume en pieds cubes du trou d'essai

W_7 = poids en g du sable utilisé

W_8 = poids en g du sable dans l'entonnoir

W = poids spécifique sec du matériau soumis aux essais en livres par pied cube.

DETERMINATION DE LA DENSITE REELLE

Les appareils nécessaires à la détermination de la densité réelle ne sont pas compris dans l'équipement de laboratoire décrit plus haut. Ils peuvent cependant facilement être improvisés à partir d'appareils déjà disponibles. La procédure à utiliser dépend de la dimension et du type de l'échantillon.

PIERRE ISOLEES

La densité réelle de pierres isolées pesant moins de 200 g peut être déterminée à l'aide de la balance à triple levier. D'ordinaire, c'est la densité réelle des pierres à leur teneur en eau naturelle qui est demandée.

Appareillage nécessaire

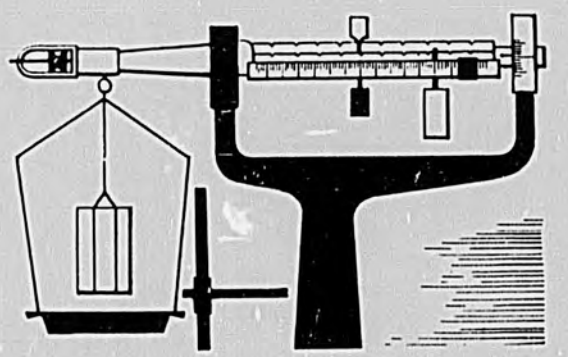
Balance à triple levier gradué

Ficelle légère ou fil

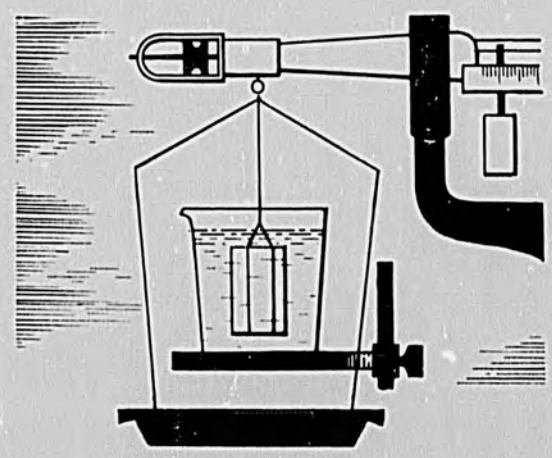
Petite boîte pour contenir de l'eau

Mode opératoire

1. Attacher un fil fin autour de la pierre et suspendre la pierre au crochet inférieur de la balance à triple levier. Peser à 0,1 g près.



2. Placer une petite boîte remplie d'eau sur un plateau, immerger la pierre dans l'eau et repeser à 0,1 g près.



3. Calculer la densité réelle de la pierre comme montré dans l'exemple de calcul. Si la ficelle ou le fil sont très légers leur poids peut être négligé.

Exemple de calcul

Poids de la pierre dans l'air ..... 163,4 g

Poids de la pierre dans l'eau ..... 100,7 g

Densité réelle

$$= \frac{\text{Poids de la pierre dans l'air}}{(\text{Poids de la pierre dans l'air}) - (\text{Poids de la pierre dans l'eau})}$$

$$= \frac{163,4}{163,4 - 100,7} = \frac{163,4}{62,7} = 2,61$$

ECHANTILLONS DE SOL

La densité réelle moyenne d'échantillons de sol peut être déterminée de la manière suivante.

Appareillage nécessaire

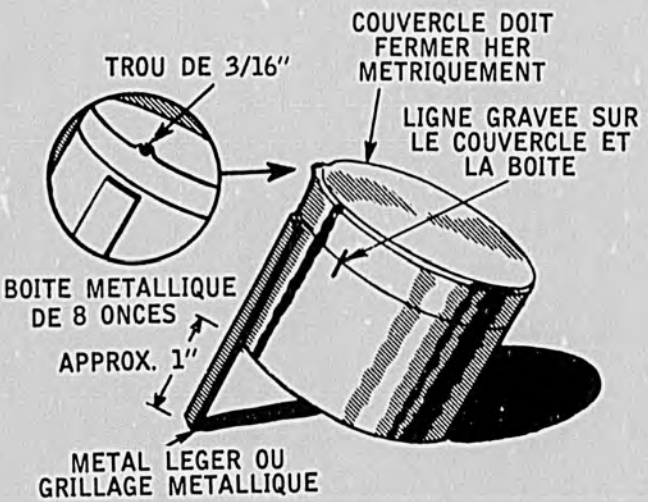
Balance de torsion

Réchaud à essence

Boîte à volume constant

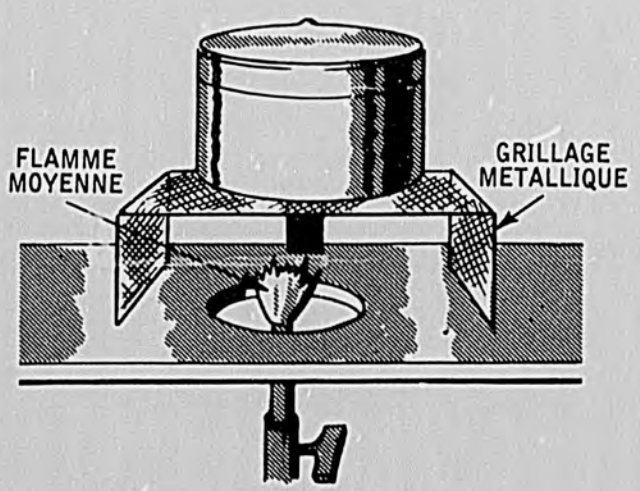
Bac

Poire



Mode opératoire

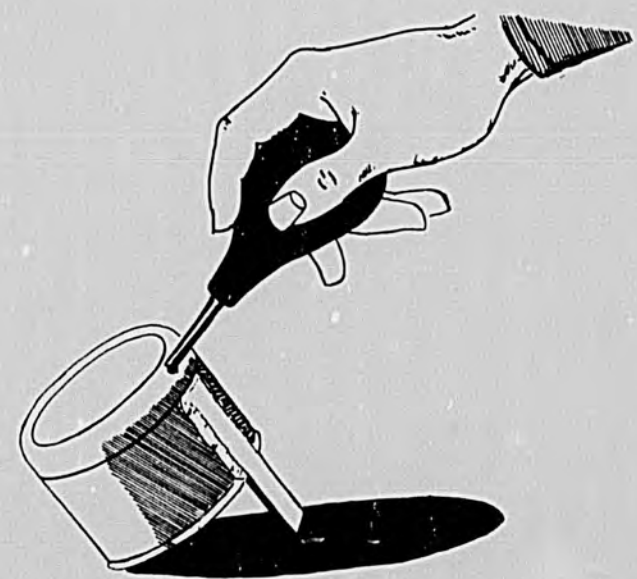
1. Peser la boîte à volume constant avec son couvercle à 0,1 g près.



2. Mettre l'échantillon séché à l'air (de 50 à 150 g) dans la boîte et peser à 0,1 g près.
3. Ajouter de l'eau jusqu'à remplir la boîte environ de moitié, mettre le couvercle et faire bouillir doucement sur le réchaud pendant au moins 30 minutes.

Remarque : faire bouillir doucement de manière à ce qu'il n'y ait pas de sol projeté hors de la boîte par le petit trou du couvercle. La boîte peut être suspendue plusieurs pouces au-dessus de la flamme, être placée sur une sole ou dans l'étuve chauffée. Pour des sables propres on peut se dispenser de faire bouillir et on peut à la place agiter avec une baguette.

4. Enlever la boîte du réchaud et la tremper dans un bac contenant de l'eau à la température ambiante. Laisser refroidir.



5. Sortir la boîte de son bain en tenant le trou tourné vers le haut, sécher l'extérieur avec un torchon et la remplir soigneusement avec de l'eau jusqu'au bord du trou. Peser à 0,1 g près.

Remarque : si le couvercle ne ferme pas de manière suffisamment étanche pour empêcher toute fuite d'eau, utiliser soit une graisse d'étanchéité épaisse ou étancher en entourant avec du ruban adhésif. Le poids de la graisse ou du ruban adhésif est inclus dans toutes les pesées.

6. Vider le contenu de la boîte, rincer jusqu'à ce qu'elle soit propre et la remplir de nouveau avec de l'eau du bac dans lequel l'échantillon a été refroidi. Sécher l'extérieur de la boîte et peser de nouveau à 0,1 g près.
7. Calculer la densité réelle de l'échantillon comme dans le calcul type ci-dessous.

Poids de la boîte ..... 76,1 g

Poids de la boîte + sol sec .....222,6 g

Poids de la boîte + sol + eau .....406,4 g

Poids de la boîte + eau .....351,1 g

Poids du sol sec = (poids de la boîte + sol sec) - (poids de la boîte)

= 222,6 - 7,61 = 146,5 g

densité =

$$\frac{\text{Poids sol sec}}{(\text{Poids sol sec}) + (\text{Poids boîte + eau}) - (\text{Poids boîte + sol + eau})}$$

$$= \frac{146,5}{146,5 + 315,1 - 406,4} = \frac{146,5}{55,2} = 2,65$$

ESSAI DE COMPACTAGE POUR LA DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU OPTIMUM ET LA DENSITE SECHE MAXIMUM

GENERALITES

La densité à laquelle un sol est compacté par une méthode donnée varie avec sa teneur en eau. La teneur en eau qui donne la densité sèche apparente la plus élevée est appelée la teneur en eau optimum de cette méthode de compactage. La teneur en eau optimum est en général inférieure à la limite de plasticité. La teneur en eau optimum décroît avec l'intensité du compactage.

La méthode de compactage de laboratoire décrite ci-dessous a été adoptée par le Génie de l'Armée américaine (Corps of Engineers) parce qu'elle produit en général la même compacité que celle obtenue sur le chantier avec le matériel de construction lourd. Cette méthode est connue sous le nom de Modified American Association of State Highway Officials Method (Modified AASHO).

Si le sol ne peut être séché avant compactage sur le chantier, la courbe de compactage doit être obtenue au laboratoire en partant de la teneur en eau in-situ, en laissant l'échantillon sécher de 2 à 3% environ entre chaque point.

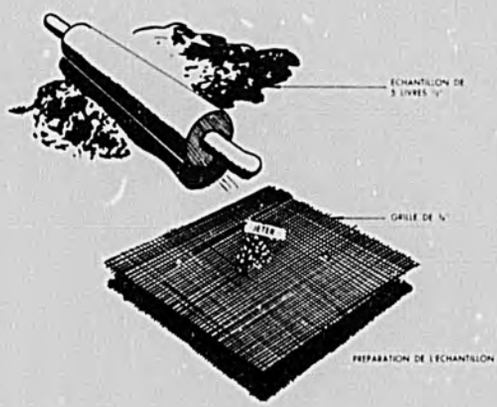
Si la teneur en eau in-situ est inférieure à l'optimum, il faut également ajouter de l'eau à quelques échantillons pour amener leur teneur en eau au-delà de l'optimum.

Appareillage nécessaire

Balance de torsion	Réchaud
Balance à triple levier	Tamis de 3/4 de pouce
Boîtes métalliques	Spatule
Moule de compactage	Rouleau
Dame de compactage	Règle à araser en acier
Etuve	

Préparation de l'échantillon

1. Préparer 5 échantillons représentatifs de matériau sec de dimension inférieur à 3/4 de pouce, de 2 kg 1/2 chacun (5 livres 1/2).
2. Désagréger les mottes de matériaux fins en roulant sur une surface plate.
3. Cribler à travers le tamis de 3/4 de pouce et jeter le refus.



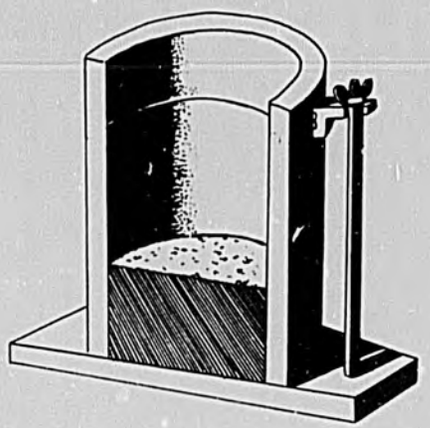
Mode opératoire

1. Mélanger un échantillon à fond avec suffisamment d'eau pour former un mélange humide qui s'émiette lorsqu'il est relâché après avoir été pressé dans la main. Ne pas rendre ce mélange initial trop humide.

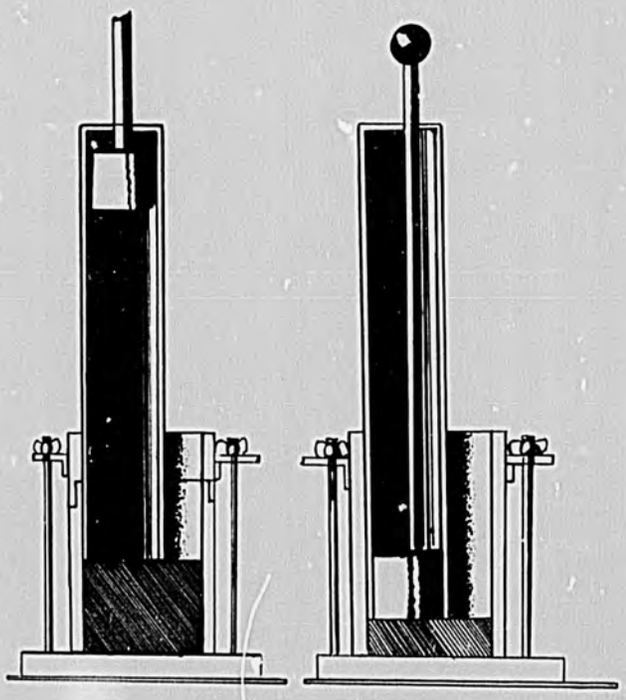
2. Ajouter de l'eau en plus, en doses de 50 cc aux 4 autres échantillons.

3. Placer chacun des 5 échantillons dans une bassine étanche et mettre en cure pendant 4 heures.

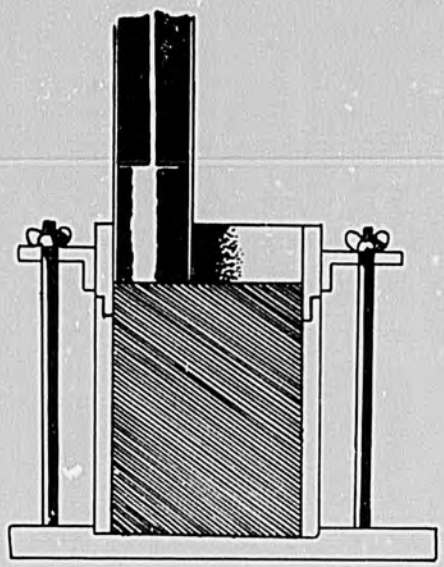
4. Peser le moule de compactage sur la balance de torsion à 5 g près ; puis visser en place la base et la hausse et placer le tout sur une fondation ferme.



5. Prendre un des échantillons mis en cure et le diviser en 5 parties égales. Placer une de ces parties dans le moule de compactage et niveler la surface à la main.
6. Placer la dame de compactage avec son fourreau sur le matériau dans le moule. Soulever le manche de la dame jusqu'à ce que celle-ci touche le haut du fourreau, ensuite lâcher le manche pour permettre à la dame de tomber sur l'échantillon.

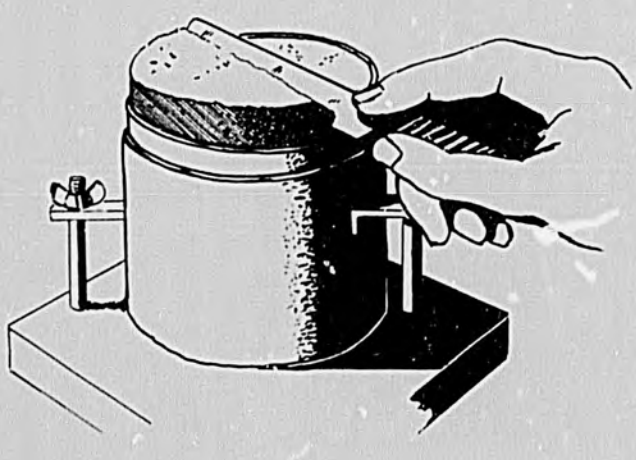


7. Changer le fourreau de position et laisser de nouveau tomber la dame. Répéter l'opération 25 fois en couvrant toute la surface de l'échantillon de manière systématique.



8. Sortir la dame du moule, mettre une autre portion de l'échantillon dans le moule et damer comme ci-dessus. Répéter avec les autres parties de l'échantillon.

Remarque : Chaque couche compactée doit avoir une épaisseur d'environ 1 pouce et après compactage de tout l'échantillon celui-ci doit entrer au moins de 1/2 pouce à l'intérieur de la hausse. Le poids de l'échantillon nécessaire pour cela est déterminé par des essais successifs ; il varie de sol en sol.



9. Enlever la hausse et araser l'échantillon jusqu'au bord du moule de compactage à l'aide du couteau. Vérifier la surface finale avec la règle.
10. Enlever la base et peser le moule contenant l'échantillon compacté à 5 g près.

11. Prélever deux échantillons (de 10 à 25 g chacun) pour déterminer la teneur en eau, un de la partie supérieure et l'autre de la partie inférieure de l'éprouvette compactée.
(La valeur moyenne est utilisée pour les calculs finaux).
12. Sortir le sol compacté du moule, pulvériser à nouveau avec le rouleau et mettre dans un bac.

Remarque : Le bâti et le vérin de l'appareil CBR peuvent être utilisés pour pousser le sol compacté hors du moule, mais l'échantillon peut aussi en être sorti en creusant à la main.

13. Répéter les opérations 5 à 12.
14. Faire plusieurs autres déterminations en ajoutant chaque fois plus d'eau jusqu'à ce que le poids de l'échantillon compacté diminue.

Exemple de calcul

Poids spécifique apparent humide =

= 0,066 x (poids de l'échantillon humide en g)

= 0,066 x 1825 = 125,5 livres /pied cube

Poids spécifique apparent sec =

$$= \frac{100 \times \text{poids sp. app. humide}}{100 + \text{teneur en eau (\%)}}$$

$$= \frac{100 \times 120,5}{100 + 7,4} = 112,2 \text{ livres /pied cube}$$

FEUILLE D'ESSAI — Echantillon N° TD-Fs4-1

ESSAI DE COMPACTAGE POUR LA DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU OPTIVUM

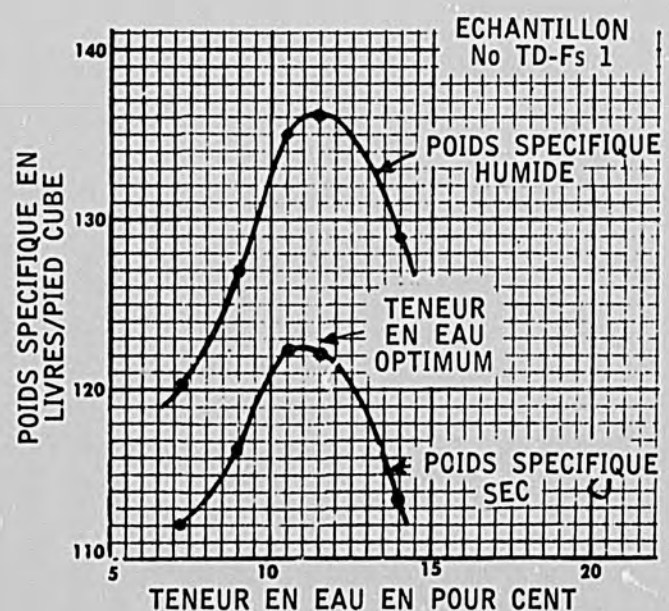
Initiales SDW
Nombre de Couches 5
Poids de la tare 10 livres
Date 14 Juin 1945
Nombre de coups par couche 25
Hauteur de chute 18 pouces

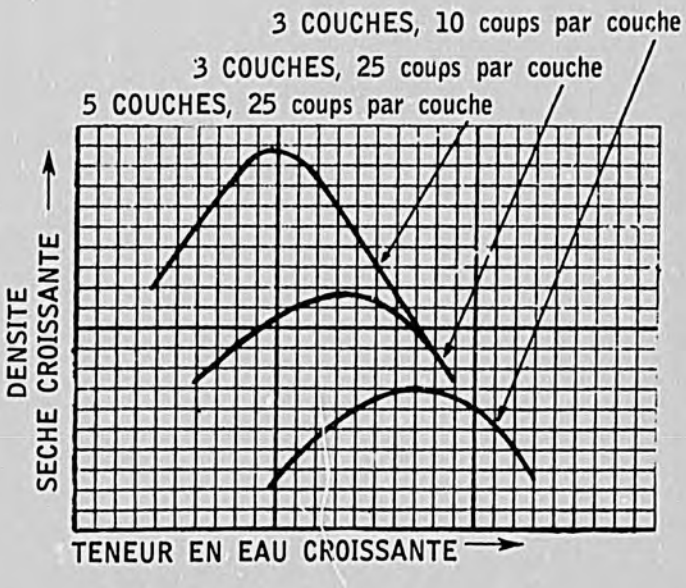
Essai N°	1		2		3		4		5	
Poids de l'éprouvette humide + moule, £	3,860		3,955		4,080		4,095		3,990	
Poids du moule, £	2,035		2,035		2,035		2,035		2,035	
Poids de l'échantillon humide, £	1,825		1,920		2,045		2,060		1,955	
Poids spécifique humide, livres/pied cube	120,5		126,7		135,0		136,0		129,0	
N° de la boîte	3	7	1	4	5	8	2	10	6	9
Poids de l'échantillon humide + boîte, £	42,24	45,34	40,36	42,92	38,96	41,11	50,83	47,61	53,88	49,50
Poids de l'échantillon sec + boîte, £	41,52	44,36	39,63	41,98	38,32	40,19	48,90	45,96	51,10	47,31
Poids de l'eau, £	0,72	0,98	0,73	0,94	0,64	0,92	1,93	1,65	2,78	2,19
Poids de la boîte, £	31,28	31,76	31,40	31,92	31,88	31,71	32,08	31,64	30,96	31,66
Poids de l'échantillon sec, £	10,24	12,60	8,23	10,06	6,44	8,48	16,82	14,82	20,14	15,65
Teneur en eau %	7,0	7,8	8,9	9,3	9,9	10,9	11,5	11,5	13,8	14,0
Teneur en eau moyenne %	7,4		9,1		10,4		11,5		13,9	
Poids spécifique sec, livres/pied cube	112,0		116,1		122,3		122,0		113,3	

Courbe de teneur en eau optimum

Porter les poids spécifiques apparents en fonction de la teneur en eau sur du papier millimétré.

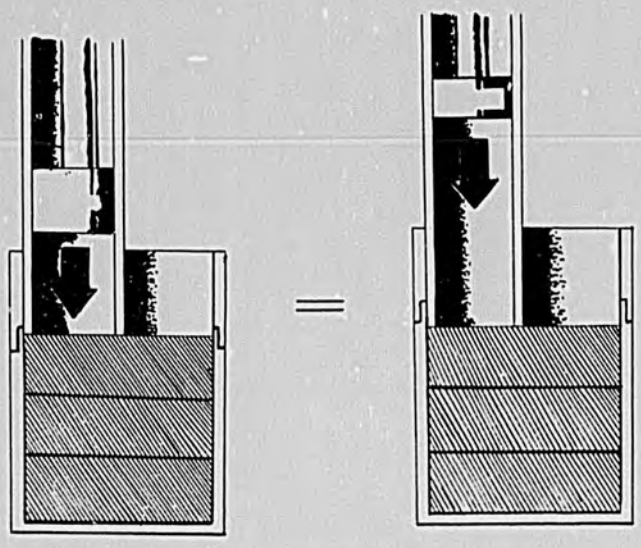
La teneur en eau optimum est celle correspondant au poids spécifique sec maximum de la courbe.





Modification du mode opératoire en fonction de conditions spéciales.

Il se peut que le mode opératoire décrit ci-dessus ne produise pas les mêmes densités que celles obtenues sur le chantier par le matériel de construction. Par exemple, un matériel transporté par avion peu produire des densités plus faibles et un matériel lourd des densités plus fortes. Dans ce cas, il faut modifier le processus de l'essai de laboratoire en changeant le nombre de couches, la hauteur de chute et le nombre de coup par couche pour produire une densité équivalente.



L'essai Proctor normal ert généralement utilisé pour le compactage en laboratoire de matériaux de couches de base stabilisées. Le moule est rempli en trois couches et on donne 25 coups par couche avec la dame de 5 livres 1/2 et une hauteur de chute de 12 pouces. Si on veut utiliser l'appareillage fourni avec l'équipement de laboratoire décrit ci-dessus, une chute de 6 pouces 1/2 avec la dame de 10 livres donne un compactage équivalent. Si le sol soumis à l'essai est un sable fin uniforme, il se peut que la dame produise des soulèvements autour de son point de chute au lieu d'un compactage. Si cela se produit, damer d'abord en plusieurs coups légers pour obtenir une stabilité initiale avant de poursuivre l'essai.

Teneur en eau optimum de sols graveleux

La teneur en eau optimum de sol graveleux doit être corrigée comme indiqué ci-dessous, si le pourcentage de graviers supérieurs à 3/4 de pouce dépasse 25%.

Exemple de calcul

Fraction du matériau de dimensions supérieures à 3/4 de pouce = 40%

Fraction du matériau de dimensions inférieures à 3/4 de pouce = 60%

Teneur en eau optimum de la fraction fine = 15%

Teneur en eau optimum du sol entier

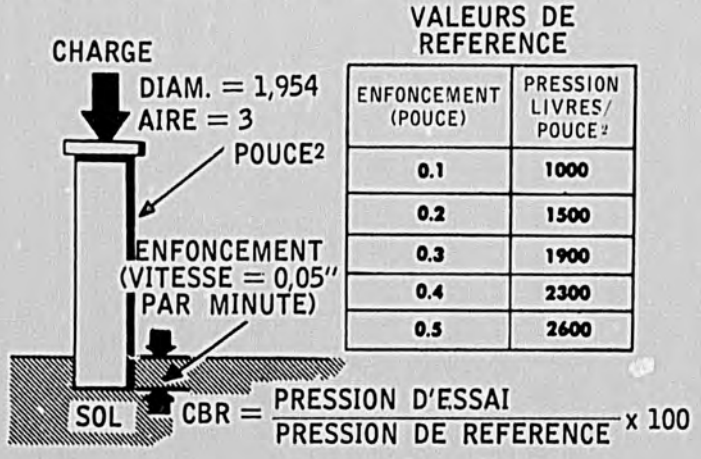
$$= \frac{(\% \text{ de la fraction fine}) \times (\% \text{ teneur en eau optimum})}{100}$$

$$= \frac{60 \times 15}{100} = 9\%$$

ESSAI DE L'INDICE PORTANT DE CALIFORNIE

Définition

L'Indice Portant de Californie (CBR) est une mesure de la résistance au cisaillement d'un sol dans des conditions de densité et de teneur en eau soigneusement contrôlées. C'est une méthode empirique qui, avec des abaques appropriés, est utilisée pour le dimensionnement des chaussées souples. Le CBR est le rapport exprimé en pour cent de la pression nécessaire pour forcer un piston à l'intérieur du sol divisé par la pression nécessaire pour force le même piston à la même profondeur à l'intérieur d'un échantillon de référence constitué de pierres concassées. Les valeurs de la pression pour diverses profondeurs d'enfoncement à l'intérieur de l'échantillon de référence sont normalisées. Le CBR utilisé pour le dimensionnement est la plus grande des deux valeurs correspondant aux enfoncements de 0,1 et 0,2 pouce. Pour la plupart des sols, c'est la valeur correspondant à l'enfoncement de 0,1 pouce qui est la plus grande.



VALEURS DE REFERENCE

ENFONCEMENT (POUCE)	PRESSION LIVRES/POUCE²
0.1	1000
0.2	1500
0.3	1900
0.4	2300
0.5	2600

Conditions d'essai

Le CBR d'un sol varie avec le compactage, la teneur en eau après compactage et la teneur en eau au moment de l'essai. Pour reproduire, par suite, les conditions de chantier, ces facteurs doivent être soigneusement contrôlés lorsque les échantillons sont préparés.

A moins qu'il ne soit certain que le sol n'accumulera pas d'eau après la construction, l'essai CBR doit être effectué sur des échantillons imbibés.

Types d'essai

Les essais CBR peuvent être faits in-situ sur le chantier en utilisant un appareillage improvisé ou au laboratoire, soit sur des échantillons intactes, soit sur des échantillons compactés dans le moule. Les essais in-situ ne sont faits que sur le sol à sa teneur en eau existant en place, mais les essais de laboratoire peuvent être faits soit sur des échantillons imbibés, soit sur des échantillons non imbibés. Chaque fois que c'est possible, l'essai est fait sur échantillons intacts. En vue du dimensionnement, il est nécessaire de faire des mesures sur des échantillons compactés au laboratoire qui peuvent ne pas reproduire les conditions de compacité et de teneur en eau obtenues par le compactage sur le chantier. Il faut, par suite, faire des essais in-situ ou des essais sur des échantillons intacts compactés sur le chantier au cours de la construction. Si les

résultats de ces essais ne concordent pas avec ceux des mesures préliminaires utilisées pour le dimensionnement, il faut soit modifier le projet, soit le compactage sur le chantier pour produire le CBR exigé.

Préparation de l'échantillon

Les procédés de préparation des échantillons compactés au laboratoire pour les essais ont été mis au point pour divers sols afin de reproduire les condition qui, selon toute probabilité, se développeront durant et après la construction. Ces procédés s'appliquent lorsque la teneur en eau durant la construction sera contrôlée et maintenue égale à l'optimum correspondant à la densité maximum AASHO modifié et lorsque le sol sera compacté à un taux au moins égal à 95% de cette densité maximum. Si d'autres contrôles de compactage sont utilisés, les procédés doivent être modifiés en conséquence.

Le CBR de sols peu plastiques non-gonflants (tels que les sables limoneux, les limons inorganiques ou argileux) est grandement affecté, à la fois dans l'état imbibé et non imbibé, par la teneur en eau de compactage et la densité à laquelle ces sols sont compactés. Lorsque l'on a à faire à de tels sols, trois échantillons sont compactés à des densités différentes mais tous à la teneur en eau optimum déterminée auparavant par la méthode de compactage de l'AASHO modifié (page 43). Chaque échantillon est soumis à l'essai après imbibition et les résultats sont portés sur un graphique pour déterminer le CBR correspondant à une compacité égale à 95% de la densité maximum (voire page 54).

Le CBR de sols non-cohérents (tels que des sables propres ou des graviers sablonneux) n'est pas très affecté par la teneur en eau de compactage. Puisque ces sols se compactent aisément sous la circulation, l'essai est effectué sur un échantillon compacté à la densité maximum.

Le CBR de sols gonflants (tels que des argiles ou des limons organiques) varie beaucoup avec les conditions du sol. Les études spéciales sont nécessaires pour déterminer la teneur en eau et la méthode de compactage les plus satisfaisants.

ESSAI SUR DES ECHANTILLONS COMPACTES AU LABORATOIRE

Appareillage nécessaire

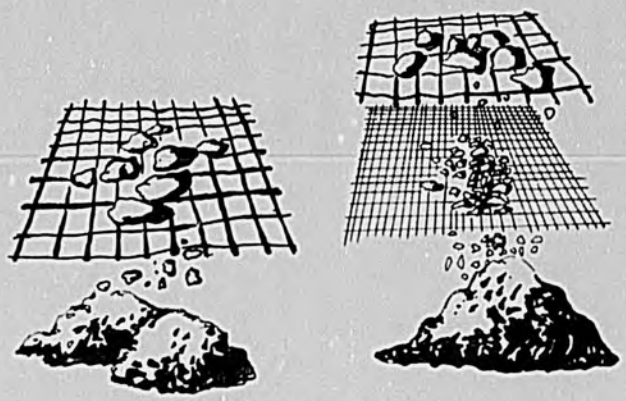
Appareil CBR	Balance à triple levier
Comparateur	Règle à araser en acier
Seau	Boîtes métalliques
Dame de compactage	Ustensiles de malaxage
Réchaud	Rouleau
Etuve	Couteau de boucher
Bac	Chronomètre
Balance dynamométrique	

Préparation de l'échantillon

Comme indiqué ci-dessus, la méthode de préparation des échantillons dépend du type du matériau soumis à l'essai.

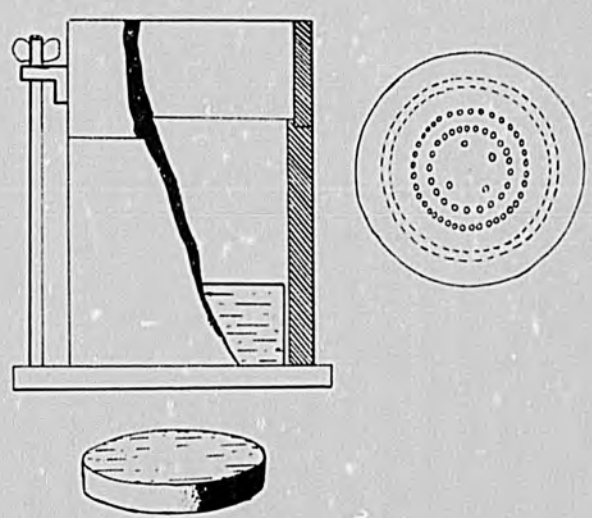
Pour préparer des sols peu plastiques non-gonflants :

1. Pulvériser environ 100 livres du matériau avec le rouleau, cribler sur la grille de 3/4 de pouce et jeter le matériau retenu. Remplacer le matériau jeté par une quantité égale de matériau passant la grille de 3/4 de pouce



mais retenue sur la grille de 1/4 de pouce.

2. Déterminer la teneur en eau optimum de ce matériau par la méthode AASHO modifié mais avec les variantes suivantes :
   a. Utiliser un matériau dont les dimensions maximum sont de 3/4 de pouce.
   b. Utiliser le moule de compactage CBR au lieu du moule de 1/30" de pied cube.
   c. Compacter le matériau avec 55 coups par couche au lieu de 25. Les couches compactées doivent avoir une épaisseur de 1 pouce.
   d. Utiliser du matériau frais pour chaque échantillon compacté.
   e. Pour déterminer la teneur en eau optimum avec précision compacter 4 échantillons dont les teneurs en eau diffèrent de l'optimum de 2% au plus (par excès ou par défaut).



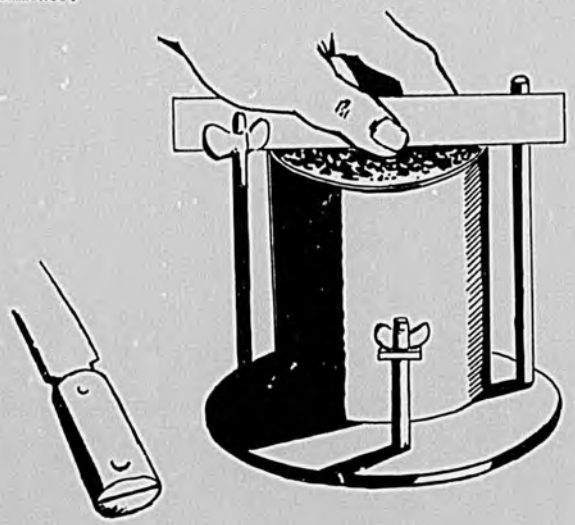
3. Mélanger environ 25 livres du matériau restant avec suffisamment d'eau pour en amener la teneur à la valeur de l'optimum déterminée au cours de l'opération 2. La teneur en eau du matériau ne doit pas différer de la valeur optimum de plus de 0,5%. Couvrir le matériau avec une toile humide pour empêcher la déperdition d'eau avant compactage.

4. Peser 3 moules CBR et fixer ces moules ainsi que les hausses aux bases. Incérer un disque d'espacement sur la base dans chaque moule.

Remarque : si des disques d'espacement n'ont pas été fournis avec l'appareil, fabriquer un disque d'une épaisseur de 2 pouces et d'un diamètre de 5,93 pouces en métal ou en bois dur. (Le bois doit être immergé dans de la paraffine chaude pour le rendre imperméable). De plus, si la base n'est pas perforée percer 28 trous de 1/8 de pouce dans la plaque de cette base.

5. Compacter 3 échantillons dans les moules en prélevant de petites quantités pour la détermination de la teneur en eau (de 20 à 50 g chacune) des couches supérieures et inférieures de chaque moule avant compactage. Compacter le premier échantillon avec 55 coups par couche, le deuxième avec 25 coups par couche et le troisième avec 10 coups par couche. La couche supérieure du matériau doit rentrer sur une hauteur d'au moins 1 pouce à l'intérieur de la hausse et chaque couche compactée doit avoir une épaisseur d'environ 1 pouce.

Remarque : si la teneur en eau des 3 échantillons compactés diffère de plus de 0,5% de l'optimum, l'essai doit être recommencé.



6. Enlever la hausse de chaque moule et araser l'échantillon jusqu'au bord du moule avec le couteau. Vérifier avec la règle.
7. Enlever la base et le disque d'espacement et peser les moules contenant les échantillons.
8. Placer du papier filtre sur la plaque de base, ensuite retourner le moule le haut en bas et le fixer sur la base. L'échantillon est maintenant près pour l'imbibition.

Pour préparer des sols non-cohérents :

1. Déterminer la teneur en eau optimum.

Remarque : un contrôle rigoureux de la teneur en eau optimum n'est pas nécessaire dans le cas de sol non-cohérent. Trois essais sont en général suffisants.

2. Compacter un échantillon à la teneur en eau optimum (opération 5 ci-dessus) avec 55 coups par couche. Puis peser l'échantillon et poursuivre par les opérations 6,7 et 8 ci-dessus.

Pour préparer des sols gonflants :

1. Déterminer la teneur en eau et la densité compactée qui sont les plus satisfaisantes. Les valeurs utilisées sont celles qui donnent le gonflement minimum lorsque l'échantillon est imbibé.
2. Mélanger l'échantillon avec suffisamment d'eau pour obtenir la teneur en eau désirée (opération 1).
3. Compacter l'échantillon dans le moule comme décrit dans l'opération 5 ci-dessus à l'exception du nombre de coups de dame qui doit être égal à celui produisant la densité désirée (opération 1 ci-dessus).
4. Peser l'échantillon et poursuivre par les opérations 6,7 et 8 ci-dessus.

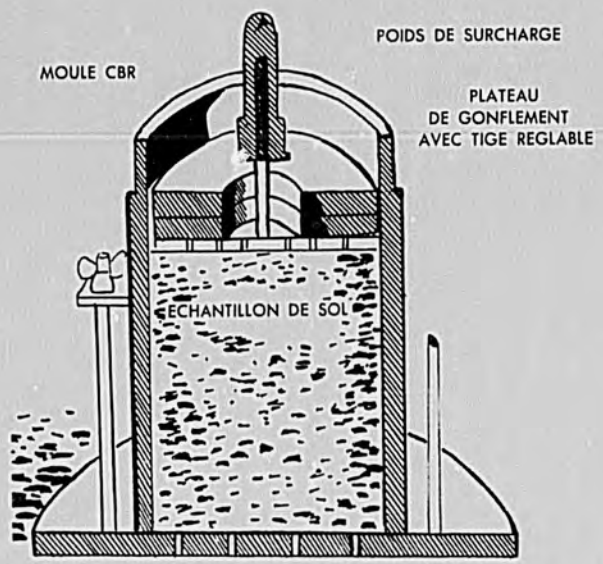
Les processus précédents sont généralement nécessaires pour la préparation de tout échantillon. Cependant, une fois qu'un ingénieur s'est familiarisé avec les sols et les variations probables dans les résultats de l'essai CBR d'une région donnée, il est parfois possible de réduire le nombre des échantillons et de simplifier les processus.

Imbibition de l'échantillon et mesure du gonflement

Pour reproduire les conditions du terrain, l'échantillon est immergé sous des poids de surcharge équivalent au poids du sol, de la couche de base ou de la chaussée surmontant le matériau étudié une fois l'ouvrage achevé. Un poids en plomb de 5 livres utilisé comme surcharge au laboratoire représente une couche de matériau sus-jacent de 3 pouces. Pour déterminer le nombre requis de poids de surcharge estimer l'épaisseur totale des matériaux sus-jacent et la diviser par 3. La surcharge totale ne doit cependant pas être inférieure à 10 livres (2 anneaux de plomb). Si la surcharge estimée diffère de celle qui serait utilisée dans le projet final de plus de 10 livres, l'essai doit être recommencé en utilisant la surcharge corrigée.

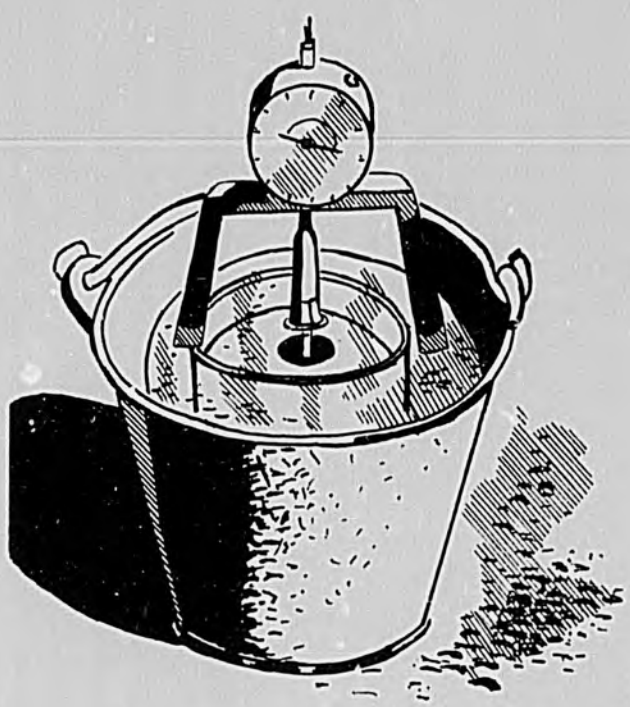
Pour imbiber l'échantillon :

1. Placer une toile métallique ou un papier filtre sur l'échantillon. Puis placer le plateau de gonflement perforé avec la tige réglable sur le papier filtre. Mettre ensuite les poids de surcharge sur le plateau.



2. Placer le trépied porte comparateur avec le comparateur sur le bord du moule et régler la tige du plateau de gonflement. Noter l'indication du comparateur. Enlever le trépied.

Remarque : marquer les emplacements où le trépied a reposé sur le moule pour que d'autres mesures puissent être faites à partir de la même position.

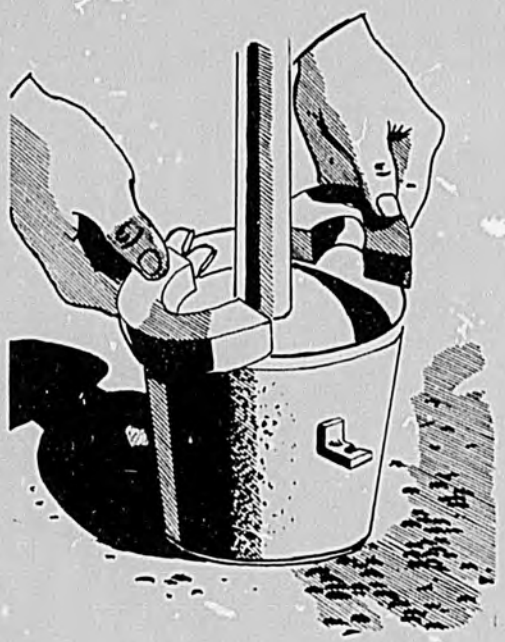


3. Immerger l'échantillon dans un seau d'eau et le laisser imbiber pendant 4 jours où jusqu'à ce qu'il soit entièrement saturé et qu'il ne gonfle plus. Mettre le trépied porte comparateur sur l'échantillon chaque jour, noter la lecture du comparateur et l'heure de cette lecture.
4. Après 4 jours, sortir le moule de l'eau, verser l'excès d'eau qui est sur la surface et laiser égoutter dans la position verticale pendant environ 15 minutes.
5. Enlever les poids de plomb, le plateau de gonflement et le papier filtre. L'échantillon est près pour l'essai.

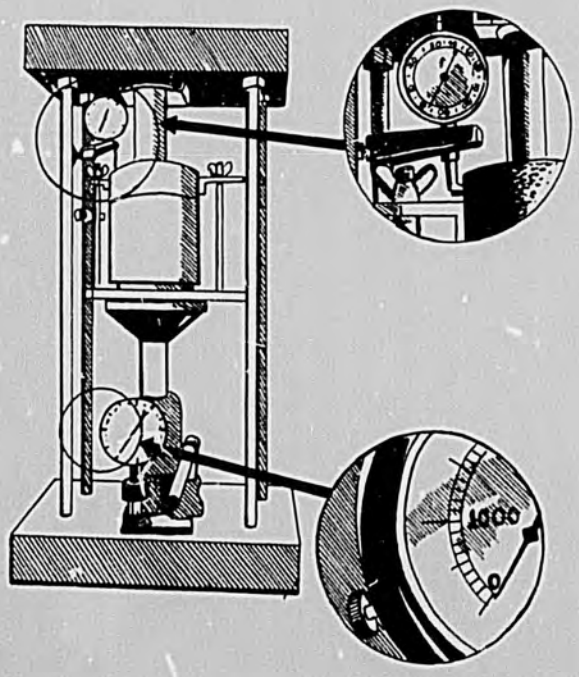
Mode opératoire de l'essai CBR (essai de poinçonnement)

1. Placer les poids de surcharge sur l'échantillon en nombre égal au poids des matériaux qui surmonteront le matériau. (Voire imbibition d'échantillon et mesure du gonflement, page 49).

Remarque : pour des échantillons très mous, ayant un CBR de 3% ou plus, on ne doit ajouter qu'un seul poids de 5 livres avant de mettre en place le piston (opération 2). Les autres poids nécessaires peuvent être ajoutés ensuite en coupant les anneaux en deux et en mettant chaque moitié par deux côtés opposés.

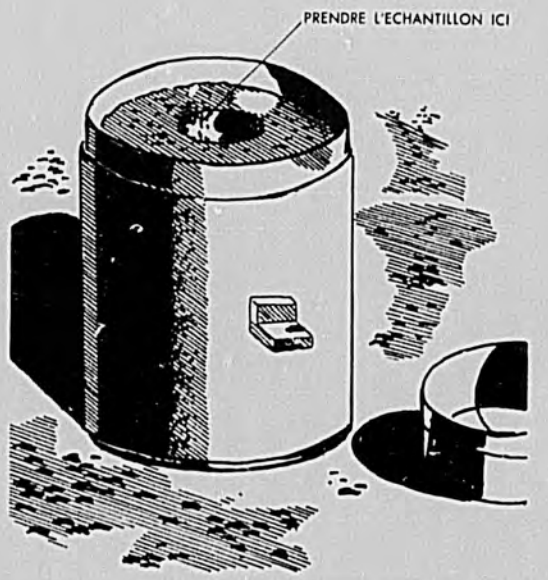


2. Placer le moule sur le plateau de la presse et ajuster le piston pour qu'il soit centré sur l'échantillon.

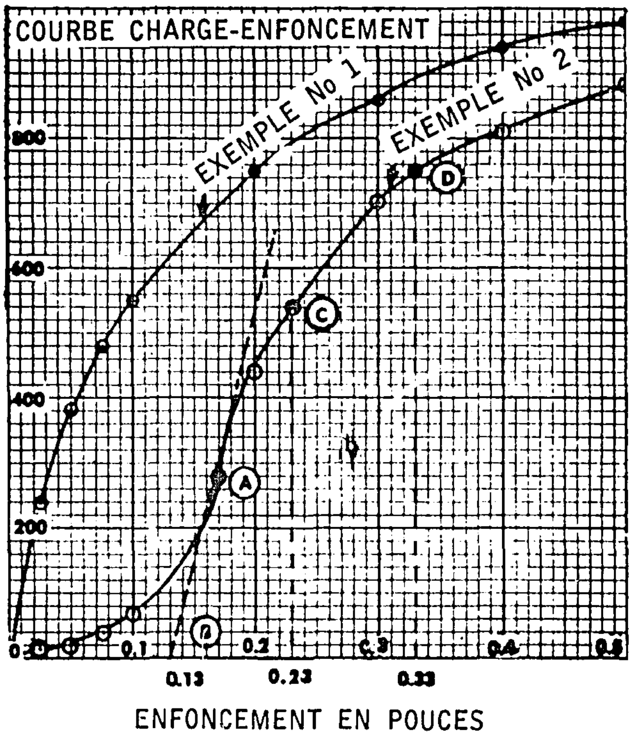


Faire monter le vérin jusqu'à ce que le piston appuie avec une charge de 10 livres. Comme cette charge est trop petite pour pouvoir être lue sur le manomètre, elle peut être estimée en tournant légèrement le piston à la main pendant que le vérin monte. Tourner le cadran du manomètre du vérin pour que l'aiguille indique zéro.

3. Régler l'extensomètre pour que la tige s'appuie sur le bord du moule. Tourner le cadran pour qu'il indique zéro.
4. Appliquer la charge de manière continue à l'aide du vérin pour que la vitesse d'enfoncement du piston soit approximativement de 0,05 pouce par minute. La vitesse d'application de la charge peut être contrôlée en mesurant le temps avec un chronomètre.
   Noter les charges correspondant aux enfoncements de 0,025 , 0,050, 0,075, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 et 0,5 pouce.
5. Relâcher la pression dans le vérin, enlever le moule de la presse et les poids de surcharge ainsi que la base.



6. Prélever un petit échantillon de (20 à 50 g) de la partie supérieure du sol dans le moule pour la détermination de la teneur en eau.
7. Tracer la courbe des pressions en fonction des enfoncements sur du papier millimétré. Si la courbe a une pente qui varie de manière monotone comme dans l'exemple N° 1, le CBR est calculé pour les enfoncements de 0,1 et de 0,2 pouce à partir des pressions mesurées. Si la courbe a un changement de concavité comme dans l'exemple N° 2, tracer la tangeante à la courbe au point qui donne la plus grande pente (point A) et prolonger cette droite jusqu'à son intersection avec l'axe des abscisses. Ce point donne le zéro corrigé (point B). Lire ensuite les valeurs corrigées de la pression correspondant aux enfoncements de 0,1 (point C) et de 0,2 pouce (point D).



Exemple de calcul

Résultats de compactage

Les calculs sont les mêmes que pour l'essai de compactage.

Résultats de teneur en eau et de densité

Poids de l'échantillon humide + moule .... 17,1 livres

Poids du moule .... 7,9 livres

Poids de l'échantillon humide (différence) .... 9,2 livres

Volume de l'échantillon

$$= \frac{\text{Aire x (Ht. du moule - Ht. du disque d'espacement)}}{1728}$$

$$= \frac{(3,14)\ (3)^3 \times (6,00 - 2,00)}{1728}$$

$$= \frac{28,26 \times 4}{1728} = 0,0654 \text{ pied cube}$$

Poids spécifique humide

$$= \frac{\text{Poids de l'échantillon humide}}{\text{Volume de l'échantillon}}$$

$$= \frac{9,2}{0,0654} = 140,6 \text{ livres /pied cube}$$

Teneur en eau de la couche supérieure

$$= \frac{3,05}{40,10} \times 100 = 7,6\%$$

Teneur en eau de la couche inférieure

$$= \frac{2,66}{32,40} \times 10 = 8,2\%$$

Teneur en eau moyenne

$$= \frac{\text{Teneur en eau de la couche sup. + teneur en eau de la couche inf.}}{2}$$

$$= \frac{7,6 + 8,2}{2} = 7,9\%$$

Poids spécifique apparent sec

$$= \frac{\text{Poids spécifique apparent humide}}{\text{100 + Teneur en eau moyenne}} \times 100$$

$$\frac{140,6}{100 + 7,9} \times 100 = 130,3 \text{ livres /pied cube}$$

Résultat du gonflement

Lecture après 4 jours .... 0,121 pouce

Lecture initiale .... 0,105 pouce

Gonflement (différence) .... 0,016 pouce

Pourcentage de gonflement

$$= 100 \times \frac{\text{Gonflement}}{\text{Ht. de l'échantillon}}$$

$$= 100 \times \frac{0,016}{4} = 0,4\%$$

Résultat du CBR

Charge à l'enfoncement de 0,1 pouce = 3150 livres

Pression

$$= \frac{\text{charge d'essai}}{3}$$

$$= \frac{3150}{3} = 1050 \text{ livres par pouce carré}$$

CBR pour l'enfoncement de 0,1 pouce

$$= 100 \times \frac{\text{Pression pour l'enfoncement de 0,1 pouce}}{\text{Pression de référence}}$$

$$= 100 \times \frac{1050}{1000} = 105\%$$

[illegible]

[illegible] TD-FS1-2

[illegible]

[illegible]	[illegible] 19 Juin 1945
[illegible] ✓	[illegible] 55 N
[illegible]	[illegible] 2 poids de 5 livres
[illegible]	[illegible] sable argileux

[illegible]

[illegible]	1	1	1	1	1
[illegible]	5	5	5	5	5
[illegible]	55	55	55	55	55
[illegible]	21	21,3	21,7	21,6	21,4
[illegible]	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
[illegible]	13,1	13,4	13,8	13,7	13,5
[illegible]	0,0982	0,0982	0,0982	0,0982	0,0982
[illegible]	133,4	136,5	140,5	139,5	137,5
[illegible]	5 / 7				
[illegible]	63,69 / 64,07	(à remplir	avec les	résultats	d'essai)
[illegible]	61,88 / 63,98				
[illegible]	1,81 / 2,09				
[illegible]	31,28 / 31,76				
[illegible]	30,60 / 32,22				
[illegible]	5,4 / 6,5				
[illegible]	6,2	6,9	8,0	9,0	10,0
[illegible]	125,6	127,7	130,1	128,0	125,0

[illegible]

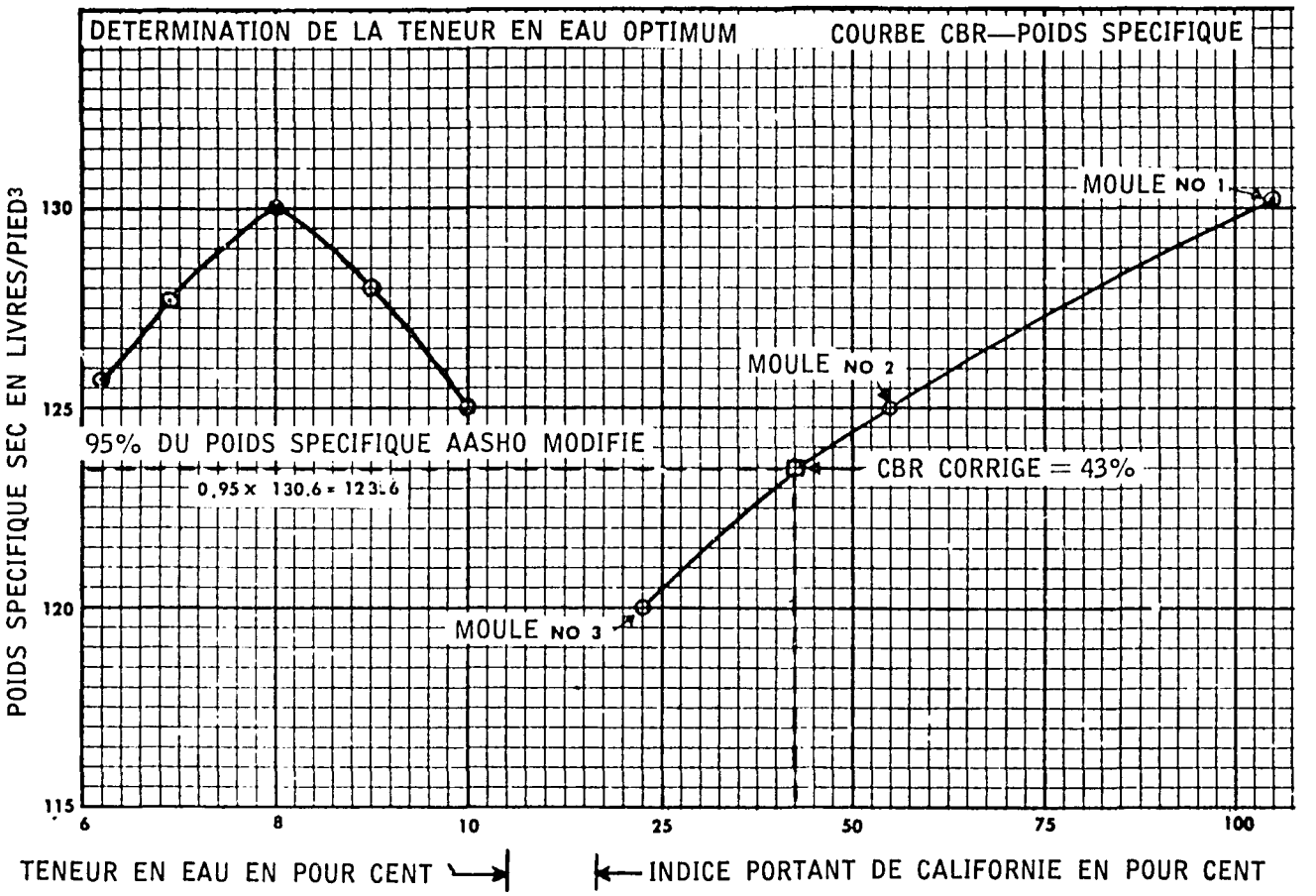
[illegible]	1		2		3	
[illegible]	5		5		5	
[illegible]	55		25		10	
[illegible]	[illegible]	Imbibé	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	17,1		16,7		16,4	
[illegible]	7,9		7,9		7,9	
[illegible]	9,2		8,8		8,5	
[illegible]	0,0654		0,0654		0,0654	
[illegible]	140,6		134,0		134,0	
[illegible]	[illegible]					
[illegible]	1 / 4 / 5					
[illegible]	74,55 / 66,98 / 71,15					
[illegible]	71,50 / 64,32	67,48	(à remplir avec	les résultats	d'essai)	
[illegible]	3,05 / 2,66	3,67				
[illegible]	31,00 / 31,92	31,88				
[illegible]	40,10 / 32,40	35,60				
[illegible]	7,6 / 8,2	10,3				
[illegible]	7,9		7,7		8,3	
[illegible]	134,3		125,0		120,0	

[illegible]

Jour	[illegible]	[illegible]	1			2			3		
			[illegible]	[illegible]		[illegible]	[illegible]		[illegible]	[illegible]	
19	10 00	0	0,105								
20	10 30	1	0,113	0,008	0,2						
21	09 30	2	0,117	0,012	0,3	(à remplir	avec	les	résultats d'essai)		
22	11 00	3	0,121	0,016	0,4						
23	10 00	4	0,121	0,016	0,4						

[illegible]

[illegible]	[illegible]	1				2				3			
		[illegible]		[illegible]		[illegible]		[illegible]		[illegible]		[illegible]	
0,025		1350	450	Courbe non rectifiée		30	10			240	80	Courbe rectifiée	
0,050		2010	670			60	20			450	150		
0,075		2610	870			120	40			600	200		
0,100	[illegible]	3150	1050			210	70	540	54	690	250		23
0,200	[illegible]	4560	1520			1320	440	740	49	910	300		21
0,300	[illegible]	5610	1870			2100	700			1020	340		
0,400	[illegible]	6000+				2430	810			1050	350		
0,500	[illegible]	6000+				2640	880			1050	350		



CBR corrigé pour une compacité de 95% AASHO modifié

Pour déterminer la valeur corrigée du CBR de sols peu plastiques non-gonflants (page 48), il faut d'abord obtenir le CBR de trois échantillons compactés à des densités différentes (page 49). La relation entre la densité et le CBR de ces trois échantillons est tracée sur du papier millimétré. Puis tracer une ligne horizontale dont l'ordonné est égale à la pression obtenue pour l'échantillon compacté avec 55 coups par couche. L'intersection de cette ligne avec la courbe pression-densité détermine la valeur corrigée du CBR pour une compacité de 95% AASHO modifié.

STABILISATION

Les sols latéritiques sont parfois amendés pour altérer leur propriétés physiques, augmenter leur résistance et leur durabilité et pour les étancher afin de produire un matériau de fondation plus satisfaisant que le même sol non stabilisé. La chaux, le ciment, les liants hydrocarbonés et le sable sont des stabilisateurs couramment utilisés. Les essais de laboratoire doivent être effectués lorsque ces stabilisateurs sont utilisés pour s'assurer que les normes du dimensionnement peuvent être atteintes et pour déterminer si la stabilisation est payante du point de vue temps et coût de l'opération. Le programme d'essai de stabilisation doit être effectué dans un laboratoire bien équipé comme les laboratoires centraux d'essais des matériaux où l'on dispose de chambres de cure. Il faut faire attention à ne pas ajouter ou trop peu ou trop de stabilisateur à un sol. En général, il faut ajouter au minimum 25% de chaux, 3% de ciment, ou 5% de liant hydrocarboné à un sol avant d'obtenir les résultats désirés. La plupart des sols latéritiques amendés peuvent être stabilisés avec des dosages en ciment de 4 à 6%. La plupart des sols latéritiques n'ont pas des caractéristiques de gonflement et de retrait très marquées, mais on devrait le vérifier avant et pendant le programme des essais.

Il est très difficile et onéreux de sécher et de pulvériser les mottes d'un sol plastique à l'aide de moyens mécaniques sur le chantier. Dans des régions de forte pluviosité, ceci peut même être impossible. Le ciment peut être utilisé pour stabiliser les sols dont l'indice de plasticité ne dépasse pas 15 et dont la fraction passant le tamis N° 200 est inférieure à 15%. Les sols ayant de telles caractéristiques physiques peuvent être malaxés avec le matériel de malaxage le plus simple. Si le matériel est meilleur, la valeur limite de l'indice de plasticité et de la fraction passant le tamis N° 200 peut être remontée à 20. Il est d'ordinaire plus pratique d'utiliser la chaux lorsque l'indice de plasticité et la fraction passant le tamis N° 200 dépassent cette valeur. Les sols ayant un indice de plasticité supérieur à 10 et plus de 30% passant le tamis N° 200, ne conviennent en général pas à une stabilisation aux liants hydrocarbonés. Les sols micacés et ceux contenant une proportion élevée de matières organiques ne réagissent pas favorablement non plus à un amendement aux liants hydrocarbonés. Si le matériau à stabiliser a un indice de plasticité supérieur à 15 et si les essais de résistance faits en laboratoire montrent que le sol amendé à la chaux n'a pas une résistance au moins égale à celle prescrite par le projet, la chaux et le ciment doivent être utilisés ensembles.

INDEX

Acide, essai à l' 12
Air, séchage à l' 22
Altération 4
Analyse granulométrique 34
Analyse granulométrique combinée 38
Argile 9

Balance à triple levier gradué 13, 26
Balance de torsion 13, 24
Brillance, essai de 12

CBR - densité, courbe 54
CBR, courbe pression-enfoncement 52
Compactage, appareil de 13
Compactage, essai de 43
Cône de sable, méthode du 40

Défloculation, solution de 36
Densité, réelle 41
Densité réelle, essai de 41

Echantillon
- composite 19
- densité réelle 41
- en vrac 19
- mis en sac 16
- quartage 20
- séchage 22
- teneur en eau 20

Etuve 13
Extinction, essai d' 12

Facteurs de Conversion viii
Feuille d'essai
- essai de compactage 46
- horizons de profil de sol 3
- Indice portant de Californie 47
- limite des dimensions des fractions de sol 5
- plasticité, essai de 32
- teneur en eau 27, 55

Ferrallitique, sol 8
Ferrisols 8
Ferrugineux, sols 8

Granulométrique, analyse 34
Graviers 9
Grilles portatives 13

Horizons 2

Indice portant de Californie 47
Installation d'un laboratoire 12

Limite de liquidité, appareil 47
Limite de liquidité, essai de 28, 31
Limon 9

Organiques, matières 9

Paraffine 14
Pesee des materiaux 24
Picnomètre 15
Plasticité, essai de 11, 28
Plasticité, essai de limite de 28, 32
Plasticité, indice de 3
Poids spécifique apparent, détermination de 41
Processus de l'essai
- Acide 12
- Analyse granulométrique 34
- Compactage 43
- Densité réelle 41
- Indice portant de Californie 47
- Limite de liquidité 31
- Limite de plasticité 28, 32
- Plasticité 28
- Poids spécifique apparent 40
- Teneur en eau 20
- Teneur en eau optimum 43

Quartage des échantillons 20

Sable 9
Séchage des échantillons 22
Secousses, essai aux 10
Sedimentometrie 35
Stabilisation 55

Tamis, analyse au 34
Tarière 13
Teneur en eau 27

Vérin hydraulique 13
Voie humide, analyse granulométrique par 27
Vrac, échantillons en 19