

Echantillonnage en laboratoire des sols et granulats

SOURCES

MODES OPERATOIRES DU LABORATOIRE
CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES
SANGLERAT - INTERNET

ECHANTILLONNAGE EN LABORATOIRE DES SOLS ET GRANULATS

1/ GENERALITES

1.01/ Définition et but de l'essai

L'échantillonnage a pour but de prélever une fraction d'un matériau telle que la partie prélevée soit représentative de l'ensemble de l'échantillon ou, si l'on veut, que la partie prélevée soit identique à celle restante. Tous les résultats des essais à réaliser dépendent du soin apporté à la réalisation de l'échantillonnage.

Le laboratoire admet que l'échantillon total envoyé est représentatif du sol à étudier. Le résultat obtenu en laboratoire ne sera finalement valable que si l'échantillon envoyé représente le sol réel. Cette question primordiale ne peut être résolue qu'en associant de plus en plus le laboratoire au prélèvement in situ (dans la mesure du possible, il est souhaitable que le prélèvement soit fait sur place par des agents du laboratoire chargé de l'étude).

Il est indispensable que la quantité de matériau reçue au laboratoire soit supérieure à la quantité nécessaire pour le ou les essais à effectuer. Ceci permet, soit de recommencer l'essai pour confirmer les premiers résultats, soit de compléter l'étude par d'autres essais non prévus à l'origine si le matériau présente certaines particularités.

1.02/ Principe de la méthode

L'échantillonnage peut s'effectuer de deux manières différentes :

- 1/ Par quartage ou fractionnement manuel d'une quantité de matériau. Cette méthode est à utiliser lorsqu'on a des quantités de matériau importantes ;
- 2/ Au moyen d'échantillonneurs, appareils séparant en deux parties égales une quantité de matériau déterminée.

2/ APPAREILLAGE

2.01/ Appareillage spécifique

- Trois échantillonneurs de différentes ouvertures suffisent, par exemple : 30 mm, 15 mm et 5 mm.
- Bacs correspondant à chaque échantillonneur (trois au moins).
- Une pelle de dimension adéquate par échantillonneur.



ECHANTILLONNEURS



PELLES

2.02/ Appareillage d'usage courant

- Plateaux en tôle pouvant éventuellement entrer sous le grand échantillonneur.
- Balance (se reporter au mode opératoire de chaque essai pour les caractéristiques de la balance).
- Pelles et truelles.



PLATEAUX



BALANCE

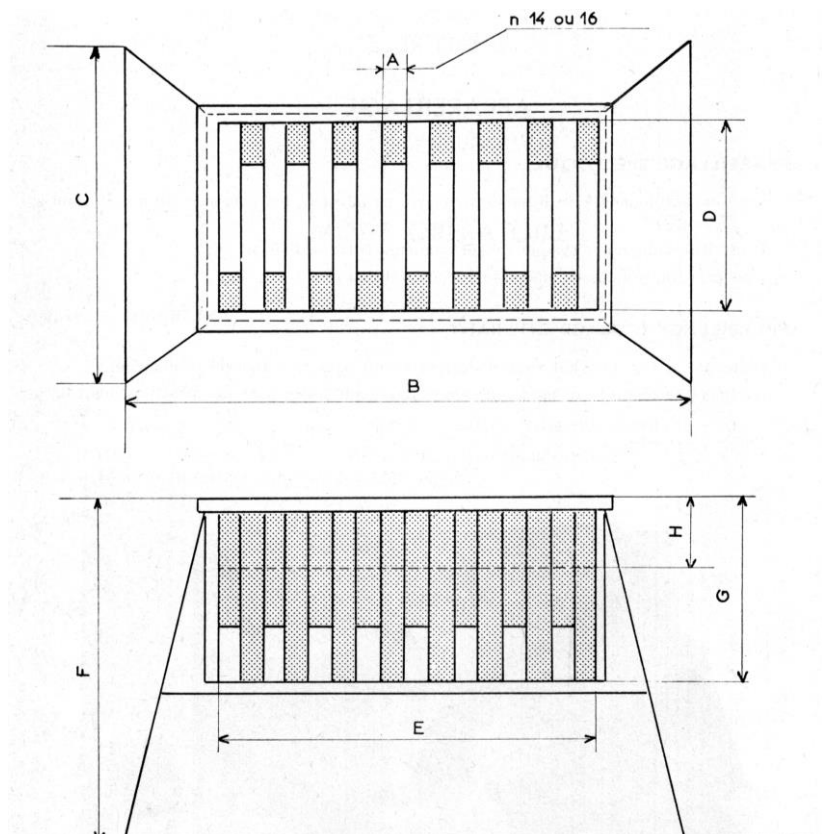


PELLE



TRUELLE

ECHANTILLONNEURS



ECHANTILLONNEURS	A	B	C	D	E	F	G	H
30 MM	30	730	440	280	520	450	240	90
15 MM	15	400	300	150	250	320	220	40
5 MM	5	150	150	90	100	150	100	40

3/ PREPARATION DE L'ECHANTILLON

L'échantillonnage à sec disperse les éléments fins qui sont, soit perdus sous forme de poussières, soit mal répartis au cours du fractionnement. Il faut éviter de perdre ces éléments fins dont le pourcentage exact doit être connu. L'échantillonnage réalisé avec le matériau légèrement humide permet d'éviter des pertes d'éléments. La méthode du quartage doit être utilisée sur une surface parfaitement lisse.

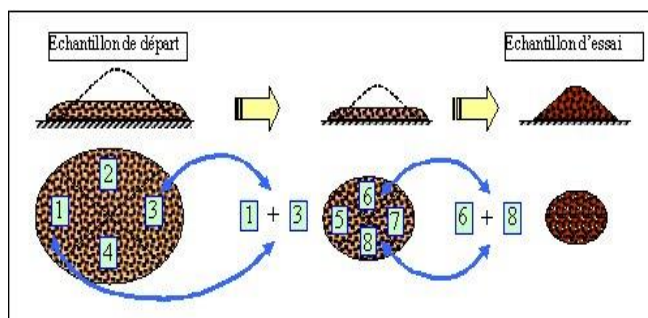
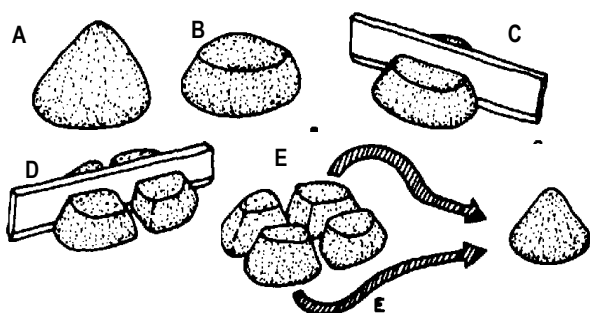
Si le matériau est sec, il faut humidifier légèrement de manière homogène. S'il est trop humide et que les éléments fins forment des agglomérats plus ou moins plastiques, il faudra le laisser sécher à l'air si possible, ou à la rigueur à des températures n'excédant pas 60 ° C. Dans le cas d'agréats pour bétons ou enrobés ne contenant en général pas de fines argileuses, le problème de la température de séchage ne se pose pas et celle-ci peut être plus élevée.

Les mottes de sol étant légèrement humides, il faut les désagréger, soit à la main, soit à l'aide d'un rouleau entouré d'une bande de caoutchouc en appliquant de faibles pressions de façon à ne pas briser les éléments, puis il faut bien brasser l'ensemble avant l'échantillonnage.

4/ MODE OPERATOIRE

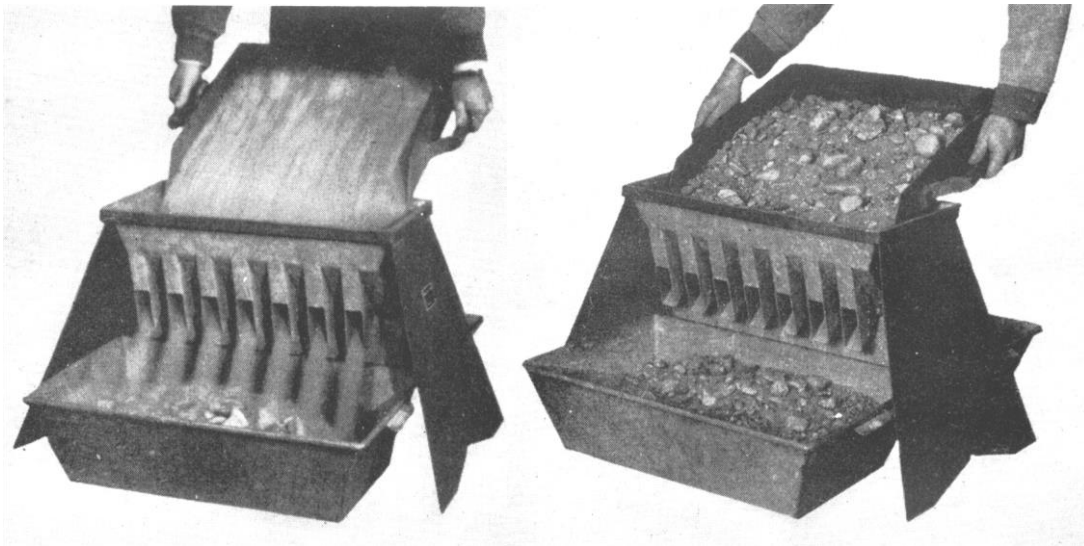
4.01/ Par quartage

- Brasser le matériau.
- Constituer un tas homogène étalé.
- Séparer le tas étalé en quatre parties à peu près égales et prélever deux parties opposées.
- Mettre en tas étalé les deux fractions ainsi obtenues et refaire l'opération si cette quantité est trop importante pour l'essai que l'on veut effectuer.



4.02/ Au moyen d'échantillonneurs

- Verser le matériau à l'aide de la pelle dans l'échantillonneur. Veiller à ce qu'il soit uniformément réparti sur toute la largeur de la pelle correspondant à l'échantillonneur utilisé.
- Si la quantité obtenue dans chaque plateau est trop importante, recommencer l'opération avec le matériau d'un des deux plateaux.



5/ COMBIEN DE FOIS ECHANTILLONNER

Pour obtenir la quantité nécessaire en vue de réaliser le ou les essais prévus, agir méthodiquement afin d'échantillonner le moins souvent possible à partir de la masse totale du matériau.

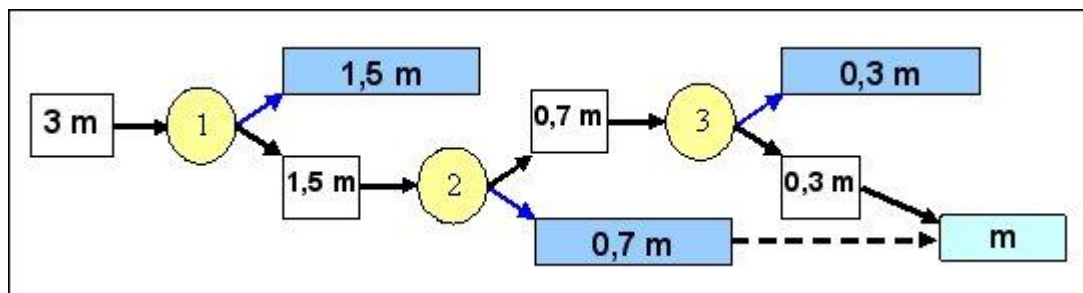
Si m est la masse nécessaire pour l'essai (se rapporter au mode opératoire de l'essai en question), comment faut-il prélever cette quantité à partir de la masse initiale quelconque M ?

$M > 4 m$ / Quelque soit la dimension des plus gros éléments, il est préférable de quarter d'abord une fois.

M est de l'ordre de $4 m$ / Faire deux échantillonnages successifs.

M est de l'ordre de $3 m$ / Deux possibilités :

1/ Faire trois échantillonnages successifs.



2/ Faire d'abord un quartage, puis les échantillonnages 2 et 3.

M est de l'ordre de $2 m$ / Faire un échantillonnage.

M est de l'ordre de $1,5 m$ / Faire les échantillonnages 2 et 3

$M < 1,5 m$ / Il est inutile de faire des échantillonnages successifs ; il est préférable de prendre la totalité pour l'essai.

6/ COMMENTAIRES

Le brassage initial étant fait, la méthode d'échantillonnage à utiliser dépend de la grosseur des éléments et de la quantité de matériau à fractionner.

Si le matériau à analyser est, par exemple, un tout-venant 0/60 mm, on pourra commencer le fractionnement par un quartage pour préparer ensuite les différentes quantités nécessaires à l'aide de l'échantillonneur de 30 mm, la séparation des éléments supérieurs à 30 mm restant sur l'échantillonneur sera faite manuellement par répartition égale entre les deux bacs.

De grandes quantités d'un matériau dont les plus gros éléments ont un diamètre inférieur à 5 mm, peuvent être échantillonnées à l'aide d'un échantillonneur de 30 mm, celui de 5 mm étant utilisé pour fractionner les petites quantités.

Mesure des caractéristiques physiques des sols

SOURCES

MODES OPERATOIRES DU LABORATOIRE
CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES
SANGLERAT – INTERNET

MESURES DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES D'UN SOL

1/ GENERALITES

La mécanique des sols étudie les problèmes d'équilibre et de déformation des masses de terre **meuble** de différentes natures, soumises à l'effet d'efforts intérieurs et extérieurs. Elle permet au constructeur d'estimer la résistance d'un sol pour les besoins constructifs et, si nécessaire, d'améliorer certaines caractéristiques de cette résistance.

Sous sa forme actuelle, la mécanique des sols se présente sous deux aspects nettement différents l'un de l'autre :

- On peut étudier le sol en place, tel qu'il est, avec ses qualités et ses défauts, en vue de l'étude et de la réalisation rationnelle des fondations de constructions ;
- On peut d'autre part, considérer le sol comme un matériau de construction destiné à réaliser des ouvrages et lui donner alors, par des manipulations et des dosages étudiés, les qualités qui lui permettront de se comporter convenablement, compte tenu de sa destination et du but poursuivi.

Que le sol soit étudié sous l'un ou l'autre de ces aspects, le constructeur le considère et l'étudie de la même manière qu'il considère d'autres matériaux tels que le béton et l'acier. Tel est le but de la mécanique des sols que l'on appelle parfois aussi **géotechnique**.

2/ DESCRIPTION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUE DES SOLS

En mécanique des sols, on étudie plus particulièrement les terrains meubles, qui sont constitués par des grains de matières minérales, végétales ou animales, tels que le quartz, la silice, les coquillages fossiles, l'**humus**, etc.

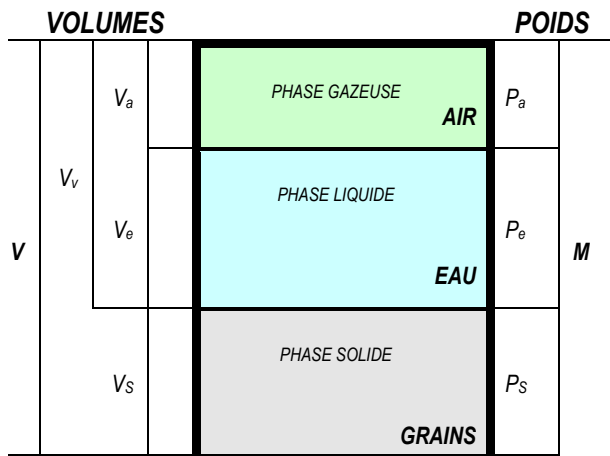
L'étude des roches présente moins d'intérêt pour le constructeur car, en général, elles sont susceptibles de supporter de fortes pressions tout en se déformant peu. Seules, d'importantes constructions comme les barrages, peuvent faire appel à la mécanique des roches.

On est ainsi amené à étudier des ensembles constitués par des grains laissant entre eux des **interstices** qui sont remplis de gaz ou de liquide. Le gaz est en général l'air et le liquide, l'eau. La masse se présente ainsi sous trois phases : **solide**, **liquide** et **gazeuse**. En un point quelconque, chaque phase se trouve dans un état d'équilibre particulier.

On appelle **terre**, l'ensemble des ces trois phases. Ses propriétés ne dépendent pas seulement de la phase solide ; elles sont fortement influencées par la présence et la nature des fluides liquides et gazeux.

On appelle **sol**, un massif de terre se trouvant dans un état de compacité et de structure déterminé.

2.1/ Schéma des différentes phases



POIDS DES DIFFERENTES PHASES

- P* : Poids total du sol (trois phases).
P_s : Poids des grains solides.
P_e : Poids de l'eau.
P_a : Poids de l'air (négligeable).

VOLUMES DES DIFFERENTES PHASES

- v* : Volume total du sol (trois phases).
v_s : Volume occupé par les grains solides.
v_e : Volume occupé par l'eau.
v_a : Volume occupé par l'air.
v_v : Volume des vides = (V_a + V_e).

Le sol est caractérisé par les paramètres suivants :

2.2/ Paramètres dimensionnels

Le poids spécifique total (ou apparent) du sol γ :

C'est le poids l'unité de volume du sol, eau et air compris. On dit aussi poids spécifique humide.

$$\gamma = \frac{P}{V}$$

Le poids spécifique des grains solides γ_s :

C'est le poids l'unité de volume de grains solides. Il est de l'ordre de 2,65 g/cm³ pour les sables et on a une valeur moyenne statistique de l'ordre de 2,70 g/cm³ pour les argiles.

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s}$$

Le poids spécifique de l'eau γ_e :

C'est le poids de l'unité de volume de l'eau (environ 1 g/cm³ ou t/m³).

$$\gamma_e = \frac{P_e}{V_e}$$

Le poids spécifique du sol sec γ_d :

C'est le poids de l'unité de volume du sol exempt d'eau interstitielle.

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V}$$

Le poids spécifique déjaugé (ou immergé) du sol γ' :

C'est le poids de l'unité de volume du sol sous une nappe d'eau, compte tenu de la poussée d'Archimède.

$$\gamma' = \gamma - \gamma_e$$

N.B./ On introduit ainsi la notion de densité par rapport à l'eau et l'on parle de densité sèche (γ_d/γ_e) ou densité humide (γ/γ_e). Il faut savoir qu'en mécanique des sols, la terminologie courante confond assez facilement les masses, les poids et les densités.

2.3/ Paramètres sans dimensions**La porosité n :**

C'est le rapport du volume des vides au volume total du sol.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

La compacité c :

C'est le rapport du volume des grains solides au volume total du sol.

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

L'indice des vides e :

C'est le rapport du volume des vides au volume des grains solides.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

La teneur en eau ω :

C'est le rapport du poids de l'eau contenue dans un certain volume de sol au poids des éléments solides compris dans le même volume. La teneur en eau est exprimée en pourcentage.

$$\omega = \frac{P_e}{P_s} \times 100$$

Le degré de saturation S_r :

C'est le rapport du volume effectivement occupé par l'eau au volume des vides, exprimé en pourcentage. Pour un sol saturé : $V_v = V_e$ et $S_r = 1$. Pour un sol sec : $V_e = 0$ et $S_r = 0$.

$$S_r = \frac{V_e}{V_v} \times 100$$

2.4/ Relations entre les grandeurs

Soit un élément de sol tel que le volume des grains solides V_s soit égal à l'unité. Le poids des grains de ce sol est par définition égal à γ_s ($P_s = \gamma_s V_s$ et $V_s = 1$) et le volume des vides a pour mesure la valeur de l'indice des vides ($e = V_v/V_s$ et $V_s = 1$ implique $e = V_v$).

e	VIDES	P_e
1	SOLIDES	$P_s = \gamma_s$

Ce schéma permet d'établir les relations suivantes :

$$S_r = V_e/V_v \implies V_e = S_r V_v \text{ et comme } V_v = e, \text{ on aura } V_e = e.S_r$$

$$\omega = \frac{P_e}{P_s} = \frac{\gamma_e.V_e}{\gamma_s} = \frac{e.S_r.\gamma_e}{\gamma_s} \text{ et } \gamma_d = \frac{P_s}{V} \implies \gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$$

$$\text{Par suite, } e = \gamma_s(1/\gamma_d - 1/\gamma_s) \text{ et } \omega = S_r.\gamma_e(1/\gamma_d - 1/\gamma_s)$$

Poids spécifique déjaugé : $\gamma' = \gamma - \gamma_e = (P/V) - \gamma_e = -\gamma_e + (P_s + P_e) : (V_s + V_e)$, Comme le sol est saturé : $S_r = 1$ donne $V_e = V_v = e$ et $P_e = e.\gamma_e$

Ce qui donne :

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_e}{1+e} ; \gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} \text{ implique } \frac{\gamma_d}{\gamma_s} = \frac{1}{1+e} \text{ et } \gamma' = \frac{\gamma_d}{\gamma_s} (\gamma_s - \gamma_e)$$

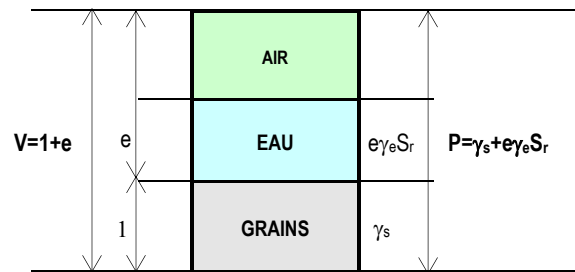
$$\gamma = \frac{P}{V} = \frac{(\gamma_s + P_e)}{(V_s + V_v)} \text{ et } S_r = \frac{V_e}{V_v} \implies V_e = S_r.V_v = e.S_r \text{ et } P_e = \gamma_e e.S_r$$

$$\text{Il vient : } \gamma = \frac{\gamma_s + \gamma_e e.S_r}{1+e} \text{ et } (1+e) = \frac{\gamma_s + \gamma_e e.S_r}{\gamma} \text{ ce qui donne : } \gamma_d = \frac{\gamma.\gamma_s}{\gamma_s + \gamma_e e.S_r} = \frac{\gamma}{1 + (\gamma_e e.S_r)/\gamma_s}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} \text{ et } \gamma' = \gamma - \gamma_e \text{ devient } \gamma' = \gamma_d(1+\omega) - \gamma_e$$

$$\text{Porosité : } n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{e}{1 + e}$$

$$\text{Poids spécifique total } \gamma = \frac{\gamma_s + \gamma_e \cdot e \cdot S_r}{1 + e} = \gamma_d + n \cdot \gamma_e \cdot S_r$$



3/ MESURE DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUE DES SOLS

3.1/ Détermination des poids spécifiques total γ et sec γ_d

3.1.1/ Méthode de l'anneau volumétrique

Cette méthode est utilisée soit en laboratoire soit in situ. Le prélèvement s'effectue à l'aide d'un anneau volumétrique (ou carottier) dont les dimensions et les formes sont étudiées de manière à modifier le sol aussi faiblement que possible.

Description des carottiers de mesure : destinés à la mesure rapide des poids spécifique du sol à éléments fins, in situ ou sur des prélèvements intacts, ils sont enfoncés dans le sol par frappe au maillet sur la tête amovible. Deux trous percés dans la tête permettent à l'air de sortir et servent à observer le remplissage.

Le diamètre du tube est sensiblement égal à la hauteur pour chacun des modèles de telle manière que le volume soit un nombre exact pour faciliter les calculs.

Connaissant le volume intérieur V du carottier et son poids à vide T , la seule pesée du carottier plein de sol et correctement arasé P_1 permet de déterminer le poids spécifique total (ou apparent) du sol :

$$\gamma = \frac{P_1 - T}{V}$$

La pesée de l'échantillon après séchage à l'étuve donne son poids sec P_s et l'on obtient ainsi :

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V}$$



Dans le cas des sols cohérents, on peut découper un bloc de sol de poids P et en déterminer le volume V par immersion dans un liquide de ce bloc recouvert d'un mince film de paraffine. La même technique est employée pour les éléments rocheux ($\gamma = P/V$).

3.1.2/ Méthode au densitomètre

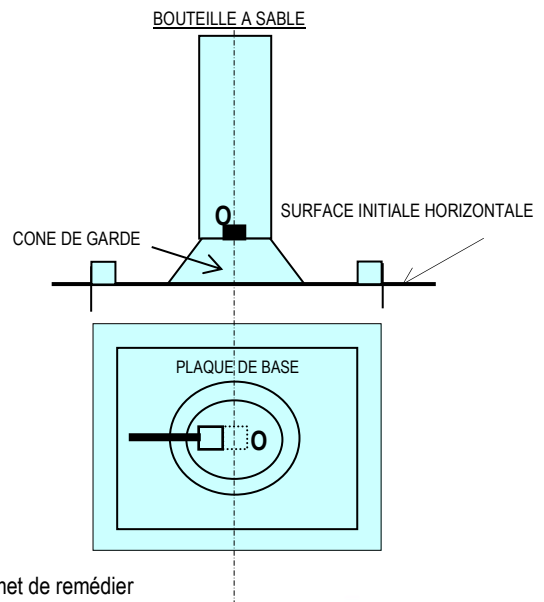
Cette méthode, utilisée in situ, consiste à creuser une cavité et peser les matériaux extraits P et à déterminer le volume de cette cavité, c'est-à-dire le volume total V qui était occupé par les matériaux extraits, en remplissant cette cavité soit :

a/ à l'aide de sable de masse volumique connue γ_s : on utilise à cet effet une bouteille à sable (voir figure) muni d'une ouverture réglable O dont on détermine le poids avant (P_i) et après (P_f) par remplissage de la cavité et du cône de garde. Connaissant le poids constant du sable contenu dans le cône de garde (P_c), on calcule aisément le volume de la cavité :

$$V = \frac{P_i + P_f - P_c}{\gamma_s}$$

et

$$\gamma = \frac{P}{V}$$



Les inconvénients majeurs de cet appareil sont :

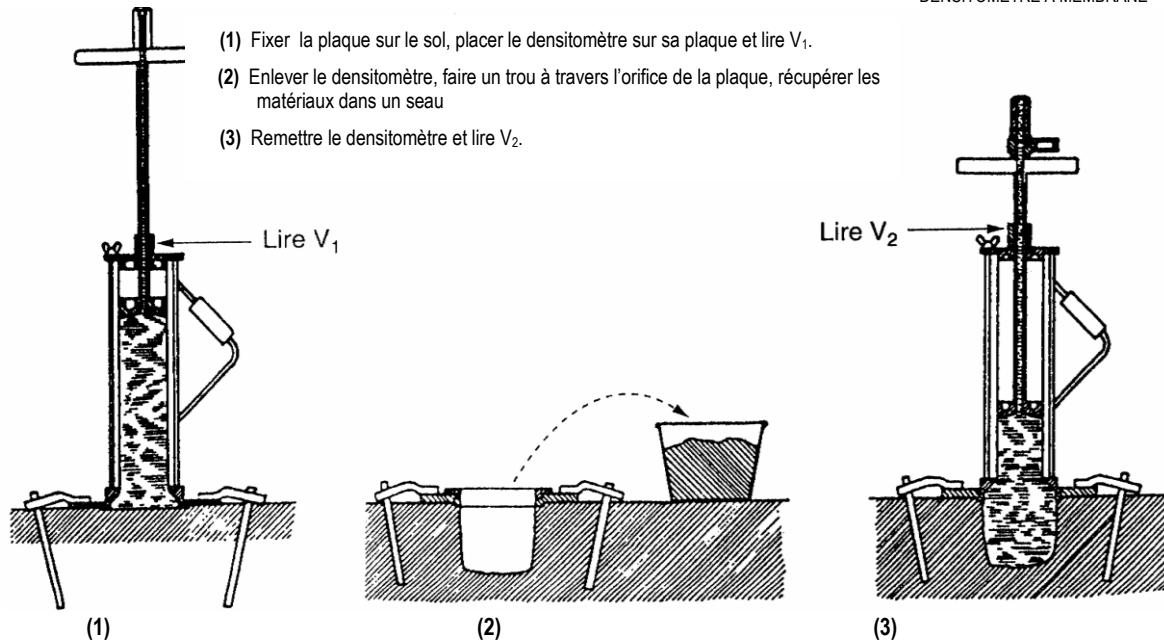
- ♦ La nécessité de réaliser une surface initiale, avant essai, horizontale ;
- ♦ La possibilité de variation du poids spécifique apparent du sable γ_s suite aux variations d'humidité ;
- ♦ La possibilité de pertes de sable dans les fissures du terrain.

b/ à l'aide d'un liquide : ce système utilisant un densitomètre à membrane, permet de remédier aux inconvénients du système précédent et de simplifier les manipulations concernant la détermination du volume, qui sont ramenées à deux lectures du niveau du liquide dans le corps du cylindre dont le fond est constitué par la membrane que l'on applique sur la surface de la cavité en agissant sur le piston à tige graduée.

C'est la simple différence des lectures finale et initiale qui fournit le volume V de la cavité. La souplesse de la membrane lui permet d'épouser très exactement la forme de la cavité et d'assurer une grande précision à la méthode.

Les dimensions de la cavité réalisée doivent être en rapport avec la dimension maximum des grains constituant le sol étudié.





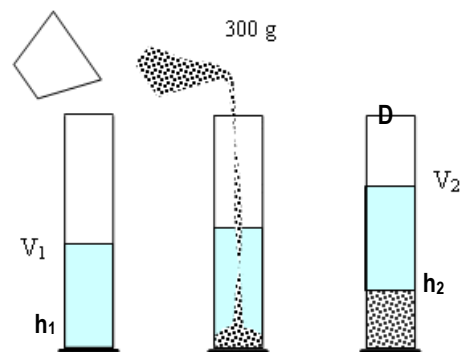
3.2/ Détermination du poids spécifique des grains solides γ_s

Méthode de l'éprouvette graduée

Le poids spécifique des grains solides est appelé aussi poids spécifique absolu du sol et peut être, en outre, ainsi défini : c'est le poids de l'unité de volume du sol supposé compact (considéré comme un ensemble formé d'un seul grain).

On utilise les mêmes méthodes que précédemment. Connaissant P et V , il est aisé de déterminer P_s , une fois les méthodes de détermination de la teneur en eau connues et V_s , à l'aide d'une éprouvette graduée, dont le principe est le suivant :

- 1/ Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
- 2/ Peser un échantillon sec P_s de granulats (environ 300 g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- 3/ Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 .



Le poids spécifique des grains solides est alors :

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_2 - V_1}$$

$$V_1 = (\pi D^2/4) h_1$$

$$V_2 = (\pi D^2/4) h_2$$

D = Diamètre de l'éprouvette

Pour opérer dans de bonnes conditions, utiliser une éprouvette graduée en verre de 500 cm³ de volume. La lecture des niveaux V_1 et V_2 doit se faire en bas du ménisque formé par l'eau. En effet, celle-ci a tendance à remonter sur les bords de l'éprouvette sur une hauteur de 1 à 2 mm, ce qui fausse bien sûr la lecture des volumes si la lecture est effectuée en haut du ménisque.

Le poids spécifique absolu des granulats silico-calcaires est pris égal, en première approximation, à 2,65 t/m³.

3.3/ Détermination de la teneur en eau (quelques méthodes)

3.3.1/ Méthodes par dessiccation

a/ A l'étuve : on prélève 30 à 50 g de sol pour les limons et argiles, 1 à 3 kg pour les graviers ou sables, on pèse l'échantillon à sa teneur en eau naturelle, soit P son poids..

On passe ensuite cet échantillon à l'étuve à 105 ° C, jusqu'à ce que son poids reste constant (désignée par P_s). La teneur en eau ω est donnée par l'expression :

$$\omega = \frac{P - P_s}{P_s} \times 100$$

Il en résulte $\omega = (P/P_s) - 1$ et $P/P_s = 1 + \omega$,
 puis $1/(1 + \omega) = P_s/P$ et $P_s = P/(1 + \omega)$
 En divisant de part et d'autre par V , on obtient :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega}$$

b/ A l'alcool méthylique : le sol pesé humide (**P**), est imbibé d'alcool méthylique que l'on brûle, ce qui entraîne l'évaporation de l'eau. L'opération est répétée jusqu'à ce que son poids devienne constant (**P_s**). Il s'agit d'une méthode rapide de chantier ; elle entraîne la perte des matières organiques, ce qui fausse donc la mesure si la teneur en eau de ces matières est notable.

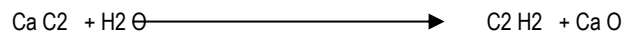
3.3.2/ Détermination à l'aide de l'appareil SPEEDY

L'appareil SPEEDY est livré sous coffret en bois verni, avec tous les accessoires nécessaires à l'emploi :

- ◆ Une balance équilibrée avec tare ajustée (aucun poids n'est nécessaire) ;
- ◆ Une cuillère de mesure de réactif ;
- ◆ Une boîte de réactif SPEEDY (suffisant pour 50 essais) ;
- ◆ Des brosses de nettoyage.

Cet appareil utilise la réaction du carbure de calcium sur l'eau et permet une détermination rapide de la teneur en eau d'un sol. Il est très simple à manipuler et donne le résultat par lecture directe en 2 ou 3 minutes sans avoir besoin d'une source de chaleur. Ce procédé rapide est assez peu précis; il est surtout utilisé pour les sables.

Un échantillon de sol est posé sur la balance de l'appareil puis mélangé par secouage au carbure de calcium. La réaction donne lieu à un dégagement gazeux d'acétylène :



La pression de l'acétylène fait mouvoir l'aiguille du manomètre formant fond de récipient. Le cadran est gradué directement en pourcentage d'eau contenu dans l'échantillon, de 0 à 20 %.

3.3.3/ Détermination au pycnomètre

a/ Généralités : La détermination de la teneur en eau d'un échantillon de sol s'obtient par la mesure du volume **V** occupé par son poids **P** de matériau humide. La connaissance du poids spécifique des éléments solides **γ_s** permet de déduire la teneur en eau.

L'essai est effectué sur un échantillon de 200 g d'éléments d'un sol passant au tamis de 5 mm. Il suppose connu, le poids spécifique des grains solides **γ_s**, ce qui est rarement le cas, mais les poids spécifiques des grains solides de nos sols varient autour de 2,65 t/m³ (ou g/cm³). Compte tenu de la précision demandée à l'essai, cette valeur a été admise comme base de calcul.

b/ Appareillage :

Appareillage spécifique : une éprouvette cylindrique (ou pycnomètre) terminée par un bouchon jauge vissé, un bouchon de caoutchouc, une machine d'agitation manuelle ou électrique.

Appareillage d'usage courant : un tamis de 5 mm avec fond, un échantillonneur de 5 mm, une spatule et une cuillère, un entonnoir, une balance précise au décigramme de portée au moins égale à 800 grammes.

c/ Exécution de l'essai : Passer le sol au tamis de 5 mm pour obtenir quatre (04) échantillons de 200 grammes.

1. Préparer deux éprouvettes et déterminer préalablement avec précision pour chacune d'elles, par pesée :

- ◆ Le poids de l'éprouvette vide munie du bouchon jauge : **P₁**;
- ◆ Le poids de l'éprouvette munie du bouchon jauge en la remplissant d'eau distillée jusqu'à son niveau supérieur : **P₂** ;
- ◆ Le volume de l'éprouvette exprimé en cm³ : **V₁ = (P₂ - P₁)**, le poids spécifique de l'eau distillée étant voisin de 1 g/cm³

2. Verser à l'aide de l'entonnoir la prise d'essai dans l'éprouvette ;

3. Peser l'ensemble (éprouvette + sol) au décigramme près et noter la masse **P₃** ;

4. Remplir à demi chaque éprouvette d'eau distillée, la boucher à l'aide du bouchon en caoutchouc et agiter sur la machine d'agitation pendant trente (30) secondes (90 coups), puis laisser reposer l'éprouvette pendant deux (02) minutes pour faire partir les bulles d'air.

5. Adapter le bouchon jauge et terminer le remplissage à l'aide d'une pissette. L'eau doit affleurer l'orifice supérieur du bouchon jauge et veiller à ce qu'il ne reste pas de bulles d'air à la surface de l'eau ;

6. Porter avec précaution l'éprouvette sur le plateau de la balance, peser l'ensemble (éprouvette + sol + eau) et noter le poids **P₄** ;

7. Faire de même le deuxième essai.

d/ Calcul et présentation des résultats : L'agitation mécanique a en principe chassé l'air occlus de l'échantillon soumis à l'essai. Dans ces conditions le volume **V** du sol humide est égal à la somme du volume **V_s** des grains solides et **V_e** de l'eau contenue dans l'échantillon, soit :

$$V = V_s + V_e \quad (1)$$

Si **γ_s** est le poids spécifique des grains solides, le poids **P** de l'échantillon humide est :

$$P = P_s + P_e = V_s \cdot \gamma_s + V_e \cdot \gamma_e = V_s \cdot \gamma_s + V_e \quad (2)$$

La teneur en eau **ω** de l'échantillon, exprimée en pourcentage, est par définition :

$$\omega = \frac{P_e}{P_s} \times 100 \quad \text{donc} \quad \omega = \frac{P_e}{P_s + P_e} \times 100 \quad (3)$$

Des relations (1), (2) et (3), on déduit la relation suivante :

$$\omega = \frac{V_s \cdot \gamma_s - P}{(P - V_s) \cdot \gamma_s} \times 100$$

L'erreur relative résultant de l'appareillage et du mode opératoire (notamment adoption de $\gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3$) est de 5 %. Cette précision suffit pour l'essai.

e/ Feuille d'essai

DESIGNATION	ECHANTILLON N° 01		ECHANTILLON N° 02	
	PRISE N° 01	PRISE N° 02	PRISE N° 01	PRISE N° 02
POIDS DE L'ÉPROUVETTE VIDE : P ₁	294,200 G	284,500 G	294,200 G	284,500 G
POIDS DE L'ÉPROUVETTE REMPLIE D'EAU DISTILLÉE : P ₂	645,900 G	642,600 G	645,900 G	642,600 G
VOLUME DE L'ÉPROUVETTE : V ₁ = P ₂ – P ₁	351,700 CM ³	358,100 CM ³	351,700 CM ³	358,100 CM ³
(SOL HUMIDE + ÉPROUVETTE) : POIDS TOTAL P ₃	474,500 G	496,600 G	459,900 G	454,700 G
(POIDS DU SOL HUMIDE) : P = P ₃ – P ₁	180,300 G	212,100 G	165,700 G	170,200 G
(SOL HUMIDE + ÉPROUVETTE + EAU) : POIDS TOTAL P ₄	748,400	763,200	742,100	740,600
VOLUME DE L'EAU RAJOUTÉE : V _R = P _R .γ _e = P ₄ – P ₃	273,900	266,600	282,200	285,900
VOLUME DE L'ECHANTILLON : V = V ₁ - V _R	77,800	91,500	69,500	72,200
TENEUR EN EAU ω	9,4	9,4	7,3	8,2
	9,4		7,7	

$$\omega = \frac{V.\gamma_s - P}{(P - V).\gamma_s} \times 100$$

V = Volume du matériau humide.

P = Poids du matériau humide.

γ_s = 2,65 g/cm³ Poids spécifique des grains solides du matériau.

3.4/ Détermination de l'indice des vides

Le prélèvement d'un échantillon à l'aide d'un carottier de mesure permet de connaître son poids P et son volume V . une des méthodes de mesure de la teneur en eau donnera P_s et le pycnomètre V_s . On obtient ainsi l'indice des vides :

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} \quad \text{et :}$$

$$e = \frac{V}{V_s} - 1$$

3.5/ Détermination du poids spécifique déjaugé

Lorsqu'un sol baigne dans l'eau, par exemple lorsqu'il est situé sous le niveau d'une nappe phréatique, il convient de séparer les effets mécaniques de l'eau et du sol immergé. Chaque grain solide est alors soumis à la poussée d'Archimède et son poids spécifique apparent est $\gamma' = (\gamma_s - \gamma_e)$. On introduit donc pour le sol, la notion de poids spécifique déjaugé.

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_e}{1 + e} \iff \gamma' = (\gamma_s - \gamma_e) \frac{1}{1 + e} \quad \text{et} \quad n = \frac{e}{1 + e} \iff (1 - n) = 1 - \frac{e}{1 + e} = \frac{1}{1 + e}$$

Donc $\gamma' = (\gamma_s - \gamma_e) \times (1 - n)$, que l'on rapprochera du poids spécifique du sol sec : ($\gamma_d = \gamma_s(1 - n)$) pour obtenir :

$$\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_e}{\gamma_s} \gamma_d$$

PARAMETRES	DEFINITION	UNITE	γ	γ_d	n	c	e	w
POIDS SPECIFIQUE HUMIDE	$\gamma = \frac{P}{V}$	g/cm ³		$(1 + \omega) \gamma_d$	$(1 - n) \gamma_s + n S_r \gamma_e$	$c \gamma_s + (1 - c) S_r \gamma_e$	$\frac{\gamma_s + e S_r \gamma_e}{1 + e}$	$\frac{(1 + \omega) S_r \gamma_s \gamma_e}{\omega \gamma_s + S_r \gamma_e}$
POIDS SPECIFIQUE SEC	$\gamma_d = \frac{P_s}{V}$	g/cm ³	$\frac{\gamma}{(1 + \omega)}$		$(1 - n) \gamma_s$	$c \gamma_s$	$\frac{\gamma_s}{1 + e}$	$\frac{S_r \gamma_s \gamma_e}{\omega \gamma_s + S_r \gamma_e}$
POROSITE	$n = \frac{V_v}{V}$	sans	$\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s - S_r \gamma_e}$	$\gamma_d (1/\gamma_d - 1/\gamma_s)$		$1 - c$	$\frac{e}{1 + e}$	$\frac{\omega \gamma_s}{\omega \gamma_s + S_r \gamma_e}$
COMPACITE	$c = \frac{V_s}{V}$	sans	$\frac{\gamma - S_r \gamma_e}{\gamma_s - S_r \gamma_e}$	$\frac{\gamma_d}{\gamma_s}$	$1 - n$		$\frac{1}{1 + e}$	$\frac{S_r \gamma_e}{\omega \gamma_s + S_r \gamma_e}$
INDICE DES VIDES	$e = \frac{V_v}{V_s}$	sans	$\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma - S_r \gamma_e}$	$\gamma_s (1/\gamma_d - 1/\gamma_s)$	$\frac{n}{1 - n}$	$\frac{1 - c}{c}$		$\frac{\omega \gamma_s}{S_r \gamma_e}$
TENEUR EN EAU	$\omega = \frac{P_e}{P_s} \times 100$	%	$\frac{S_r \gamma_e (\gamma_s - \gamma)}{\gamma_s (\gamma - S_r \gamma_e)}$	$S_r \gamma_e (1/\gamma_d - 1/\gamma_s)$	$\frac{n S_r \gamma_e}{(1 - n) \gamma_s}$	$\frac{(1 - c) (S_r \gamma_e)}{c \gamma_s}$	$\frac{e S_r \gamma_e}{\gamma_s}$	
DEGRE DE SATURATION	$S_r = \frac{V_e}{V_v} \times 100$	%	$\frac{\gamma (1/\gamma_d - 1/\gamma)}{\gamma_e (1/\gamma_d - 1/\gamma_s)}$	$\frac{\gamma (1/\gamma_d - 1/\gamma)}{\gamma_e (1/\gamma_d - 1/\gamma_s)}$	$\frac{(1 - n) \omega \gamma_s}{n \gamma_e}$	$\frac{\omega \gamma_s c}{\gamma_e (1 - c)}$	$\frac{\omega \gamma_s}{e \gamma_e}$	$\frac{\omega}{\gamma_e (1/\gamma_d - 1/\gamma_s)}$
(0 % ≤ S _r ≤ 100 %) ----- S _r = 0, ω = 0 : sol sec ----- S _r = 100 % : sol saturé					(0 ≤ n ≤ 1)		(PEUT DEPASSER 1)	(PEUT DEPASSER 100 %)

FEUILLES D'ESSAIS

DIFFERENTS PARAMETRES CARACTERISANT LE SOL

1/ A L'ANNEAU VOLUMETRIQUE

DATE.....		
PROVENANCE.....		
DOSSIER.....		
OPERATEUR.....		
DIAMETRE DU CAROTTIER	D	
POIDS DU CAROTTIER VIDE	P ₁	
POIDS DU CAROTTIER PLEIN DE SOL HUMIDE	P ₂	
POIDS DE L'ECHANTILLON DE SOL HUMIDE	$P = P_2 - P_1$	
POIDS DE L'ECHANTILLON APRES ETUVAGE	P _s	
VOLUME DE L'ECHANTILLON DE SOL	$V = \pi D^3/4$	
POIDS SPECIFIQUE TOTAL DU SOL	$\gamma = \frac{P}{V}$	
POIDS SPECIFIQUE DU SOL SEC	$\gamma_d = \frac{P_s}{V}$	
POIDS SPECIFIQUE DEJAUGE DU SOL	$\gamma' = \gamma - \gamma_e$	
TENEUR EN EAU	$\omega = \frac{P - P_s}{P_s} \times 100$	

2/ AU DENSITOMETRE A MEMBRANE

DATE.....		
PROVENANCE.....		
DOSSIER.....		
OPERATEUR.....		
LECTURE AVANT ESSAI	V ₁	
LECTURE APRES ESSAI	V ₂	
VOLUME DE L'ECHANTILLON HUMIDE	$V = V_2 - V_1$	
POIDS DU RECIPIENT VIDE	P ₁	
POIDS DU RECIPIENT ET DE L'ECHANTILLON HUMIDE	P ₂	
POIDS DE L'ECHANTILLON HUMIDE	$P = P_2 - P_1$	
PRISE D'ECHANTILLON	POIDS HUMIDE	P
	POIDS SEC	P _s
	TENEUR EN EAU	$w = \frac{P - P_s}{P_s} \times 100$
POIDS SPECIFIQUE TOTAL DU SOL	$\gamma = \frac{P}{V}$	

POIDS SPECIFIQUE DU SOL SEC	$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega}$	
POIDS SPECIFIQUE DEJAUGE DU SOL	$\gamma' = \gamma - \gamma_e$	

TENEUR EN EAU PAR DESSICCATION

DATE PROVENANCE DOSSIER OPERATEUR		
POIDS DU RECIPIENT VIDE	T	
POIDS DU RECIPIENT ET DE L'ECHANTILLON HUMIDE	P ₁	
POIDS DE L'ECHANTILLON HUMIDE	P = P ₁ - T	
POIDS DU RECIPIENT ET DE L'ECHANTILLON SEC	P ₂	
POIDS DE L'EAU	P _e = P ₁ - P ₂	
POIDS DE L'ECHANTILLON SEC	P _s = P ₂ - T	
TENEUR EN EAU	$\omega = \frac{P_e}{P_s} \times 100$	

MASSE VOLUMIQUE DES GRAINS SOLIDES γ_s

DATE PROVENANCE DOSSIER OPERATEUR		
POIDS DU RECIPIENT VIDE	T	
POIDS DU RECIPIENT ET DE L'ECHANTILLON SEC	P ₁	
POIDS DE L'ECHANTILLON SEC	P _s = P ₁ - T	
HAUTEUR CORRESPONDANT AU VOLUME V ₁	h ₁	
HAUTEUR CORRESPONDANT AU VOLUME V ₂	h ₂	
VARIATION DE HAUTEUR	$\Delta H = h_2 - h_1$	
RAYON DE L'EPROUVETTE CYLINDRIQUE	r	
VOLUME DE L'ECHANTILLON	$V_s = \pi r^2 \Delta h$	
POIDS SPECIFIQUE DES GRAINS SOLIDES	$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s}$	

AUTRES PARAMETRES

INDICE DES VIDES	e	
POROSITE	n	
COMPACITE	c	
DEGRE DE SATURATION	S _r	