

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة ابن خلدون تيارت
Université Ibn Khaldoun Tiaret



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Nutrition et Technologie Agro-alimentaire

Polycopié TP&TD Agronomie I
2eme année Sciences Agronomiques

Présenté par : Mr BOUMAAZA Boualem
Maitre de Conférences « A »

Etablissement de Rattachement : Université Ibn Khaldoun Tiaret
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Année universitaire : 2021 - 2022

SOMMMAIRE

Travaux dirigés

TD N°1 : Relations entre les unités de mesure utilisées en sciences des sols

TD N°2 : Exercices sur l'aspect physique du sol (système à trois phases)

Travaux pratiques

TP N°1 Analyse granulométrique par tamisage a sec

TP N°2 Analyse granulométrique par sédimentométrie

TP N°3 Mesure le poids volumique des particules solides ρ_s

TP N°4 Mesure de la teneur en eau W:

TP N°5 Perméabilité des sols

TP N°6 pH du Sol

TP N°7 dosage du calcaire total (Calcimétrie) ou/et dosage de la matière organique

TP N°8 Dosage de la matière organique.

Références Bibliographiques

TRAVAUX DIRIGÉS

TD N°1 : Relations entre les unités de mesure utilisées en sciences des sols

Quelles mesures sont effectuées ?

Deux jeux de mesures du sol. Le premier jeu, appelé caractérisation du sol, décrit les propriétés chimique et physique de chaque horizon d'un profil pédologique. Certaines mesures de caractérisation du sol sont effectuées sur le terrain alors que d'autres sont réalisées en laboratoire ou en classe. Toutes ces mesures sont effectuées une fois par site.

Le second jeu de mesures, appelé température et humidité du sol, sert à déterminer la quantité d'eau et la température du sol à différentes températures. Ces mesures sont réalisées de manière répétitives et comparées aux mesures de précipitation et de température de l'air effectuées lors de l'étude de l'atmosphère.

Mesures de caractérisation du sol

Sur le terrain

Description du site

Profondeur des horizons

Structure du sol

Couleur du sol

Consistance du sol

Texture du sol

Racines

Cailloux

Carbonates

En classe ou en laboratoire

Masse volumique

Densité particulaire

Distribution granulométrique

pH

Fertilité du sol (teneur en N, P, K)

Relations entre les paramètres physiques des sols

Paramètres	Définitions	n	e	γ	γ_d
Teneur en eau ω (%)	$\omega = \frac{W_w}{W_s}$	$\omega = \frac{n.S_r.\gamma_w}{(1-n).\gamma_s}$	$\omega = \frac{e.S_r.\gamma_w}{\gamma_s}$	$\omega = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$	$\omega = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$
Porosité n	$n = \frac{V_a + V_w}{V}$	-	$n = \frac{e}{1+e}$	$n = 1 - \frac{\gamma}{(1+\omega).\gamma_s}$	$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$
Indice des vides e	$e = \frac{V_a + V_w}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s}$	$e = \frac{n}{1-n}$	-	$e = \gamma_s \cdot \frac{(1+\omega)}{\gamma} - 1$	$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$
Poids volumique apparent γ (KN/m ³)	$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_w + V_a}$	$\gamma = (1-n)(1+\omega)\gamma_s$	$\gamma = \frac{(1+\omega)}{1+e}.\gamma_s$	-	$\gamma = (1+\omega).\gamma_d$
Poids volumique apparent sec : γ_s (KN/m ³)	$\gamma_s = \frac{W_s + W_a}{V_s + V_w + V_a} = \frac{W_s}{V}$	$\gamma_s = \gamma_s.(1-n)$	$\gamma_s = \frac{\gamma_s}{1+e}$	$\gamma_s = \frac{\gamma}{1+\omega}$	-
Poids volumique des grains : γ_s (KN/m ³)	$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$	$\gamma_s = \frac{\gamma}{(1-n)(1+\omega)}$	$\gamma_s = (1+e).\gamma_d$	$\gamma_s = \frac{\gamma}{(1-n)(1+\omega)}$	$\gamma_s = \frac{\gamma_d}{(1-n)}$

Ils indiquent dans quelles proportions existent les différentes phases d'un sol.

On définit :

La teneur en eau : $\omega = (W_w / W_s) \times 100$

L'indice des vides : $e = V_v / V_s$

Le degré de saturation : $S_r\% = (V_w / V_v) \times 100$

La porosité : $\eta = V_v / V$

$$\gamma_d = \gamma / (1 + \omega)$$

$$\gamma_d = \gamma_s / (1 + e)$$

$$e = (\gamma_s / \gamma_d) - 1$$

$$S_r = \omega G_s / e$$

Exercice: 1

Démontrer les relations suivantes :

(1) $e = n / (1 - n)$

(2) $\gamma_d = \gamma / (1 + \omega) = \gamma_s / (1 + e)$

(3) $S_r = (w.\gamma_s) / (\gamma_w.e)$

(4) $w_{sat} = n.\gamma_w / (\gamma_{sat} - n.\gamma_w)$

Correction

$$(1) e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v \cdot V}{V_s \cdot V} = \frac{n \cdot V}{V_s} = \frac{n \cdot V}{V - V_v} = \frac{n}{1 - n}$$
$$(2) \gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s \cdot W}{V \cdot W} = \gamma \cdot \frac{W_s}{W} = \gamma \cdot \frac{W_s}{W_s + W_w} = \frac{\gamma}{1 + w}$$
$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s \cdot V_s}{V \cdot V_s} = \gamma_s \cdot \frac{V_s}{V} = \gamma_s \cdot \frac{V_s}{V_s + V_v} = \frac{\gamma_s}{1 + e}$$
$$(3) S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w \cdot W_w}{V_v \cdot W_w} = \frac{W_w}{\gamma_w \cdot V_v} = \frac{W_w \cdot W_s}{\gamma_w \cdot V_v \cdot W_s} = \frac{w \cdot W_s}{\gamma_w \cdot V_v} = \frac{w \cdot W_s \cdot V_s}{\gamma_w \cdot V_v \cdot V_s} = \frac{w \cdot \gamma_s}{\gamma_w \cdot e}$$
$$(4) w_{sat} = \frac{W_w}{W_s} = \frac{\frac{W_w}{V_w}}{\frac{W - W_w}{V_w}} = \frac{\gamma_w}{\frac{V \cdot W}{V \cdot V_w} - \gamma_w} = \frac{n \cdot \gamma_w}{\gamma_{sat} - n \cdot \gamma_w}$$

Exercice : 2

Trouver la relation reliant le poids volumique saturé γ_{sat} avec les poids volumiques γ_d , γ_w et γ_s .

Correction

$$(1) \gamma_{sat} = \frac{W}{V} \quad \text{avec } S_r = 1 \text{ ou encore } V_v = V_w$$
$$\gamma_{sat} = \frac{W_w + W_s}{V} = \frac{W_w \cdot V_w}{V \cdot V_w} + \gamma_d = \gamma_w \cdot \left(1 - \frac{V_s}{V}\right) + \gamma_d = \gamma_w \cdot \left(1 - \frac{V_s \cdot W_s}{V \cdot W_s}\right) + \gamma_d$$
$$\text{Ainsi : } \gamma_{sat} = \gamma_w \cdot \left(1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}\right) + \gamma_d$$

Exercice : 3

Un sol saturé est caractérisé par un poids volumique saturé γ_{sat} et une teneur en eau w_{sat} .

(1) Déterminer l'expression littérale de l'indice des vides e , de la porosité n et du poids volumique du sol γ_s en fonction des paramètres connus.

(2) En considérant 1 m^3 du sol, déterminer les expressions des volumes respectifs d'air V_a , d'eau V_w et de solide V_s .

Correction

(1) À partir du poids volumique apparent (ici saturé) et de la teneur en eau, on peut déterminer le poids volumique sec par la relation :

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w} = \frac{\gamma_{sat}}{1 + w_{sat}}$$

Partons des deux relations suivantes (démontrées précédemment) :

$$S_r = \frac{w \cdot \gamma_s}{\gamma_w \cdot e} = \frac{w_{sat} \cdot \gamma_s}{\gamma_w \cdot e} = 1 \text{ car limon saturé et } \gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + e}$$

On peut ainsi exprimer l'indice des vides : $e = \frac{w_{sat}}{\frac{\gamma_w}{\gamma_d} - 1}$

Puis le poids volumique du squelette : $\gamma_s = \gamma_d(1 + e)$

La porosité se déduit ensuite de l'indice des vides :

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

Exercice: 4

On a réalisé un sondage de reconnaissance dont la coupe est donnée dans la coupe ci-dessous. A l'arrivée des caisses de carottes au laboratoire, on a pris deux échantillons sur lesquels on a fait les mesures usuelles de poids et volume:

	Echantillon n° 1	Echantillon n° 2
Poids total du sol	0.048 kg/m ³	0.068 kg/m ³
Volume total du sol	3.10-5 m ³	4.3 10-5 m ³
Poids sec (après étuvage à 105°C)	0.030 kg/m ³	0.040 kg/m ³

Déterminer pour chaque échantillon :

- le poids volumique et la teneur en eau.
- l'indice des vides, si l'on suppose que le poids volumique des particules solides est égal à 2753 kg/m³.
- le degré de saturation dans la même hypothèse.
- la variation relative de volume pendant son prélèvement et son transport au laboratoire, sachant que γ_s a été trouvé égal à 2824 kg/m³.

Correction :

On dispose pour chaque échantillon de W, V et W_s

a) $\gamma = W/V$ d'où $\gamma_1 = 0.048 / 3.10^{-5} \text{ m}^3 = 1600 \text{ kg/m}^3$ et $\gamma_2 = 1581 \text{ kg/m}^3$

$\omega = W_w/W_s$ avec $W_w = W - W_s$ donc $W_{w1} = 0.048 - 0.030 = 0.018 \text{ kg}$ et $W_{w2} = 0.028 \text{ kg}$. d'où

$\omega_1 = 0.018 \text{ kg} / 0.030 \text{ kg} = 0.6 = 60\%$ et $\omega_2 = 70\%$

b) $e = V_v/V_s$ avec $V_s = W_s/\gamma_s$ donc $V_{s1} = 0.030 \text{ kg} / 2753 \text{ kg/m}^3 = 1.089 \cdot 10^{-5}$ et $V_{s2} = 1.45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$
et $V_v = V - V_s$ donc $V_{v1} = 3.10^{-5} - 1.089 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

$V_{v1} = 1.911 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ et $V_{v2} = 2.85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$
d'où $e_1 = 1.911 \cdot 10^{-5} / 1.089 \cdot 10^{-5} = 1.75$ et $e_2 = 1.96$

c) $S_r = V_w / V_v$ avec $V_w = W_w / \gamma_w$ donc $V_{w1} = 0.018 \text{ kg} / 1000 \text{ kg/m}^3 = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ et $V_{w2} = 2.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ Alors $S_{r1} = 1.8 \cdot 10^{-5} / 1.91 \cdot 10^{-5} = 0.94 = 94\%$ et $S_{r2} = 0.98 = 98\%$ donc pour les 2 échantillons recueillis dans la nappe, on a une légère perte de saturation en eau lors du transport au laboratoire

d) Les volumes V considérés jusqu'à présent sont ceux déterminés au laboratoire et sont légèrement supérieurs à ceux in situ qu'on appellera V' à cause de la décompression.

On calcule les valeurs de V_s avec $\gamma_s = 2824 \text{ kg/m}^3$, on trouve $V_{s1} = 1.062 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$ et $V_{s2} = 1.052 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$

Comme les 2 échantillons sont saturés in situ, alors $V' = V_s + V_w$ alors $V_1 = 2.889 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ et $V_2 = 4.25 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

Ainsi on peut calculer la variation relative de volume par $\Delta V / V' = (V - V') / V'$ d'où $(\Delta V / V')_1 = (3 - 2.889) / 2.889 = 0.038 = 3.8\%$ et $(\Delta V / V')_2 = 0.011 = 1.1\%$.

Exercice : 5

Le prélèvement d'un échantillon intact au centre d'une couche d'argile molle située sous la nappe phréatique 2 a permis de procéder aux mesures suivantes, en laboratoire, sur un morceau de l'échantillon :

Poids total	Volume total	Poids sec
0.047 kg	$3.13 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$	0.0258 kg

- e) Déterminer le poids volumique et la teneur en eau.
- f) Déterminer l'indice des vides.
- g) Pour vérifier la saturation du sol, on mesure le poids volumique des particules solides, $\gamma_s = 2700 \text{ kg/m}^3$. Calculer le degré de saturation.

Correction:

a) $\gamma = W / V = 0.047 \text{ kg} / 3.13 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 15 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^3$

$\omega = W_w / W_s$ avec $W_w = W - W_s = 0.047 - 0.0258 = 0.0212 \text{ kg}$ d'où $\omega = 0.821 = 82\%$

b) $e = V_v / V_s$ or l'échantillon ayant été prélevé dans la nappe phréatique, il est saturé donc $V_v = V_w = W_w / \gamma_w = 0.0212 \text{ kg} / 1000 \text{ kg/m}^3 = 2.12 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ et $V_s = V - V_v = 3.13 \cdot 10^{-5} - 2.12 \cdot 10^{-5} = 1.01 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

$$d'o\grave{u} e = 2.12 \cdot 10^{-5} / 1.01 \cdot 10^{-5} = 2.10$$

c) On peut d\u00e9terminer $V_s = W_s / \gamma_s = 0.0258 \text{ kg} / 2700 \text{ kg/m}^3 = 0.96 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ donc $V_v = V - V_s = 2.17 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ d'o\grave{u} $S_r = V_w / V_v = 2.12 \cdot 10^{-5} / 2.17 \cdot 10^{-5} = 0.9769 = 97.7\%$

Exercice : 6

On connaît pour un sol :

Le poids volumique = 1400 kg/m^3

La teneur en eau = 40%

Le poids volumique des particules solides = 2700 kg/m^3

Calculer alors le poids volumique sec, le degr\u00e9 de saturation, l'indice des vides, la porosité, le poids volumique satur\u00e9 ainsi que le poids volumique d\u00e9jaug\u00e9.

Correction :

On utilise le tableau du cours donnant les relations entre les param\u00e8tres du sol. $\gamma = \gamma_d (1+w)$ donne $\gamma_d = \gamma / (1+w) = 1400 / (1+0.4) = 1000 \text{ kg/m}^3$

$$w = S_r \gamma_w (1/\gamma_d - 1/\gamma_s) \quad S_r = w / \gamma_w (1/\gamma_d - 1/\gamma_s)$$

$$S_r = 0.4 / 1000 (1/1000 - 1/2700) \quad S_r = 0.64 = 64\%$$

$$e = \gamma_s / \gamma_d - 1 = 1.7$$

$$n = e / (1+e) = 0.63$$

$$\gamma = \gamma_d + n S_r \gamma_w \text{ donne (avec } S_r = 1) \gamma_{\text{sat}} = \gamma_d + n \gamma_w = 1630 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 630 \text{ kg/m}^3$$

Exercice : 7

Un \u00e9chantillon de sol satur\u00e9 pr\u00e9lev\u00e9 sous le niveau de la nappe phr\u00e9atique a pour poids volumique \u00e9gal \u00e0 2000 kg/m^3 . Au dessus du toit de la nappe, le m\u00eame sol a un poids volumique de 1800 kg/m^3 . Calculer son degr\u00e9 de saturation sachant que le poids volumique des particules solides vaut 2700 kg/m^3 .

Correction :

Evidemment il s'agit de d\u00e9terminer le degr\u00e9 de saturation du sol au dessus de la nappe (au dessous, le degr\u00e9 de saturation est 100 %). On dispose pour le m\u00eame sol de $\gamma_{\text{sat}} = 2000 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 1800 \text{ kg/m}^3$, $\gamma_s = 2700 \text{ kg/m}^3$.

l'indice des vides (il est le même au dessus et au dessous de la nappe) $e = (\gamma_s - \gamma_{sat}) / (\gamma_{sat} - \gamma_w) = 0.7$. Ensuite la relation 20 par exemple permet de déterminer $S_r = 51 \%$.

Exercice : 8

Le prélèvement d'un échantillon intact au centre d'une couche d'argile molle située sous la nappe phréatique a permis de procéder aux mesures suivantes, en laboratoire, sur un morceau de l'échantillon :

Poids total	Volume total	Poids après passage a l'étuve à 105 ° C
0,47 N	$3,13 \times 10^{-5} \text{m}^3$	0,258 N

Notes: 1 kg= 9,8N; 1 N= 0.1 Kg ; 1 kN= 100 kg= 1000 N=1tonn

- Déterminer le poids volumique γ et la teneur en eau ω .
- Déterminer l'indice des vides e (on rappelle que l'échantillon est sous la nappe phréatique et est mou)
- En déduire γ_s
- Calculer le degré de saturation S_r .

Réponses:

- $\omega = 82 \%$; $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$
- $e = 2,10$
- $w = w_{sat}$ d'où $\gamma_s = 25,61 \text{ kN/m}^3$
- $S_r = 100 \%$

Exercice: 9

Connaissant la teneur en eau ω d'un sol saturé et γ_s le poids volumique des particules solides, déterminée :

- son poids volumique sec γ_d
- son indice des vides e .

Réponses:

- $\gamma_d = 1 / [1/\gamma_s + \omega / \gamma_w]$;
- $e = \omega \gamma_s / \gamma_w$

Exercice : 10

On connaît pour un sol

- le poids volumique $\gamma = 14 \text{ kN/m}^3$
- la teneur en eau $\omega = 40 \%$
- le poids volumique des particules solides $\gamma_s = 27 \text{ kN/m}^3$

Calculer :

- a) Le poids volumique du sol sec γ_d .
- b) Le degré de saturation S_r .

Réponses :

- a) $\gamma_d = \gamma / (1 + \omega) = 10 \text{ kN/m}^3$
- b) $S_r = \omega \gamma_s / (\gamma_w [\gamma_s - \gamma]) = 0,64$.

Exercice: 11

Un échantillon de sol saturé prélevé sous le niveau de la nappe phréatique a pour poids volumique $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$. Au-dessus du toit de la nappe, le même sol a un poids volumique de 18 kN/m^3 .

Calculer son degré de saturation S_r , sachant que le poids volumique des particules solides vaut $\gamma_s = 20 \text{ kN/m}^3$.

Réponses:

- a) $S_r = [\gamma_s \gamma_{\text{sat}} + \gamma_w - \gamma_s \gamma_w - \gamma_s \gamma] / \gamma_w (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_s) = 0,51\%$.

TD N°2 : Exercices sur l'aspect physique du sol (système à trois phases)

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz. Il est donc, en général, constitué de trois phases:

Sol = phase solide + phase liquide + phase gazeuse

Entre les grains du squelette, les vides peuvent être remplis par de l'eau, par un gaz ou les deux à la fois.

Le gaz contenu dans les vides entre les particules est généralement de l'air lorsque le sol est sec ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide (cas le plus fréquent) (Figure1).

L'eau peut remplir plus ou moins tous les vides entre les grains et être mobile (écoulement plus ou moins rapide). Lorsque l'eau remplit tous les vides, le sol est dit saturé. Dans les régions tempérées, la plupart des sols en place, à quelques mètres de profondeur sont saturés.

Lorsqu'il n'y a pas d'eau, le sol est dit sec.

L'étude complète des sols non saturés, qui constituent un milieu à trois phases, est très complexe.

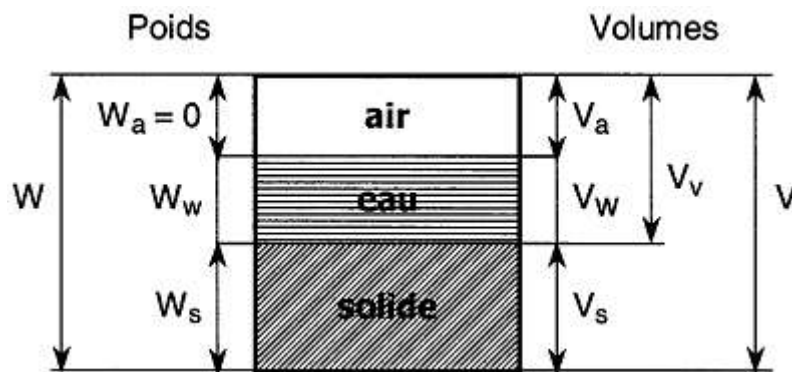


Figure 1. Représentation conventionnelle d'un volume de sol
Poids et volumes des différentes phases

Exercice N°1 :

Un échantillon d'argile saturé à une masse de 1526g et un volume de 862,14 cm³, après passage à l'étuve, sa masse n'est plus que 1053 g. Le constituant solide des grains a une densité de 2,7. Déterminer :

- 1- La teneur en eau
- 2- L'indice des vides
- 3- La porosité
- 4- Le poids volumique humide
- 5- La densité humide
- 6- Le poids volumique sec
- 7- La densité sèche

Exercice N°2 :

Un échantillon de sol a un volume de 0,1 m³ et pèse 1,8 KN. La teneur en eau déterminée au laboratoire est de 12,6%. Le constituant solide des grains a une densité de 2,71. Déterminer :

- La masse volumique du sol
- Le poids volumique humide
- Le poids volumique sec
- L'indice des vides
- La porosité

Exercice N°3 :

1. Calculer le poids volumique sec et le poids volumique saturé d'un sol ayant un indice des vides $e=0.70$ et un poids volumique des particules solides $\gamma_s= 27\text{KN/m}^3$.
2. Calculer aussi son poids volumique humide et sa teneur en eau à un degré de saturation $S_r=75\%$.

TRAVAUX PRATIQUES

TP 1 : Analyse granulométrique par tamisage a sec

- On appelle granulats un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, de provenance naturelle ou artificielle
- Les granulats sont appelés fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballast suivant leurs dimensions

I. But de l'essai:

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des fillers. A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulats.

II. Principe de l'essai:

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. La fraction granulométrique supérieure à 0,063 mm est déterminée par tamisage à sec, tandis que la fraction inférieure à 0,063 mm est déterminée par sédimentation continue (méthode hydrométrique).

Analyse granulométrique par tamisage à sec

Ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant l'échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

Refus sur un tamis : partie du matériau retenu sur un tamis.

Tamises ou passant : partie du matériau passant à travers les mailles d'un tamis.

Matériel nécessaire :

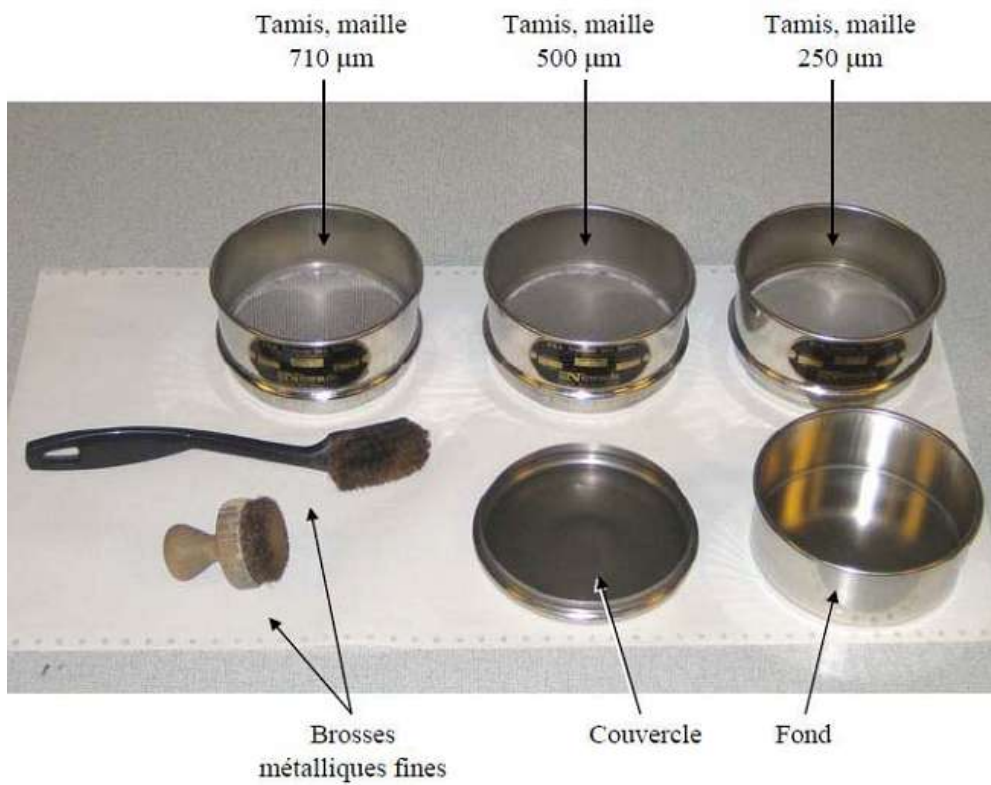
- Une série de tamis
- Une étuve pour le séchage

- Brosse
- Balance électrique



Tamis à maille carrée

Tamiseuse à vibration 3D



Préparation des échantillons

Les échantillons de sols et sédiments sont séchés à l'air et tamisés à 2 mm. La matière organique est détruite pour l'analyse granulométrique par attaque à l'eau oxygénée à 30 volumes, d'abord à froid, puis en chauffant à 40°C.

- Peser 30g de terre fine séchée a l'air dans un bêcher de 500 ml.
- Ajouter 50 ml d'eau oxygénée (30 volumes).
- Laisser au repos une nuit.
- Porter sur plaque chauffante (éviter une ébullition trop forte. car l'eau oxygénée serait décomposée trop rapidement).
- Renouveler les additions d'eau oxygénée jusqu'li destruction complète de la matière organique.
- La réaction qui se produit est la suivante $C_{org} + 2 H_2O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$.

Principe :

Le principe de cette manipulation consiste à prendre un échantillon de sol séché au préalable et de le verser dans une colonne de tamis dont les tamis sont classés dans l'ordre croissant des ouvertures de bas en haut. La pesée des refus des tamis permet de tracer la courbe granulométrique.

Mode opératoire

- Commencer par dresser la colonne des tamis. Les ouvertures des tamis doivent être croissantes de bas en haut. Les tamis à prendre en compte sont en mm : **2 – 1.25 – 0.5 – 0.25 – 0.125 – 0.08 – 0.063.**
- Peser un échantillon de sol sec d'environ 0.5 kg.
- Verser le sol sur le tamis supérieur et mettre le couvercle.
- Procéder à l'agitation mécanique pendant environ 5 min.
- Procéder à la pesée cumulée des refus des tamis en commençant par le tamis supérieur.

Compte rendu :

Pour le calcul des pourcentages et le tracé de la courbe granulométrique, le procédé est le suivant:

M est la masse totale de l'échantillon.

Compléter le tableau des calculs.

Tracer la courbe granulométrique.

Déterminer les différents diamètres (D10, D30 et D60) et les deux coefficients C_u (coefficient d'uniformité) et C_c (coefficient de courbure), en sachant que :

(D10, D30 et D60) : étant respectivement les diamètres correspondant à 10%, 30% et 60% d'éléments de dimension inférieure.

Le coefficient d'uniformité ou de Hazen :

N° Tamis	Ouverture des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (g)	Tamisé cumulé (%)
1	M1	M1	$R1 = 100 \cdot M1 / M$	$T1 = 100 - R1$
2	M2	M1+M2	$R2 = 100 \cdot (M1+M2) / M$	$T2 = 100 - R2$
3	M3	M1+M2+M3	$R3 = 100 \cdot (M1+M2+M3) / M$	$T3 = 100 - R3$

2- Le coefficient d'uniformité ou de Hazen :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

3- Le coefficient de courbure :

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} * d_{60}}$$

TP 2 : analyse granulométrique par sédimentométrie

Méthode par utilisation hydromètre

Lorsque la dimension des particules est inférieure à 80 μm le tamisage n'est plus possible. On a alors recours à la sédimentométrie. Cette méthode est basée sur la loi de Stokes qui exprime la vitesse limite de chute d'une particule sphérique dans un liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule.

Matériel utilisé:

1/Deux éprouvettes de 1 litre

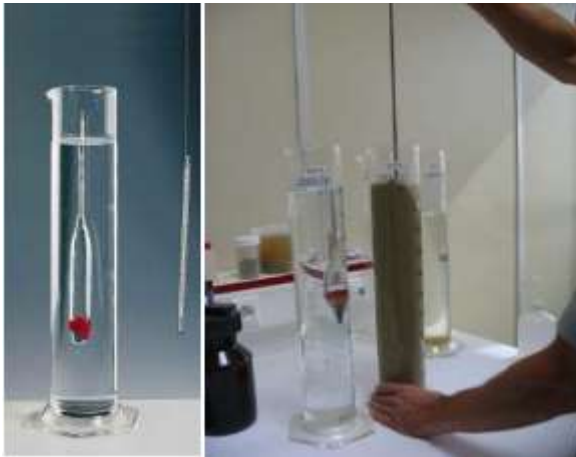
2/ Un densimètre gradué

3/ Un agitateur mécanique à grande vitesse de rotation (de l'ordre de 10 000 tr/mn)

4/ Un agitateur manuel (tige avec disque en tôle)

5/ Un thermomètre ; chronomètre

6/ Un agent défloculent (héksamétaphosphate de sodium $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$)



Eprouvettes normalisées et densimètres



Un agitateur mécanique

4.1 Le densimètre

4.1.1 Principe

Un densimètre sert à mesurer la densité relative d'un liquide, à savoir le rapport de la densité du liquide sur la densité de l'eau. Sur un densimètre, la valeur de l'eau distillée est 1.

Le principe de fonctionnement du densimètre est basé sur une loi de la physique: la poussée d'Archimède. Selon cette dernière, tout corps plongé dans un liquide reçoit une poussée vers le haut dont la force est égale au poids du volume du liquide déplacé.

4.1.2 L'instrument

Le densimètre est une fiole en verre qui possède un renflement ou une bulle dans sa partie inférieure qui contient des grenailles de plomb. La partie supérieure est étroite et contient l'échelle de graduation qui a été réalisée et étalonnée pour une température précise.



Préparation de l'échantillon :

La procédure consiste à prendre 30 cm³ de défloculant dilué dans de l'eau distillée pour obtenir 250 cm³ de suspension. On ajoute 40 gr de sol sec récupéré du tamisât à 80 µm (fond du tamis). L'ensemble sera soumis à l'agitation mécanique pendant 3mn environ. Et complétée avec de l'eau distillée jusqu'à 1000 cm³.

Essai :

Destruction de la matière organique et des carbonates

Dans un bécher de 1000 ml, peser précisément environ 40,0 g d'échantillon sec de granulométrie inférieur à 0.063mm.

- Ajouter 10 ml d'acide acétique pour détruire les carbonates.
- Ajouter 20 ml de peroxyde d'hydrogène 30 %.
- Chauffer légèrement la solution sur une plaque chauffante tout en agitant pour démarrer la réaction. La retirer au besoin pour contrôler le dégagement gazeux.
- Ajouter 100 ml de la solution dispersante. Ajouter de l'eau pour obtenir un volume total d'environ 400 ml et 10 gouttes d'anti-mousse B.
- Fermer le couvercle et placer le contenant en position couchée sur l'agitateur horizontal.
- Agiter à environ 180 agitations/minute pendant une nuit.
- Retirer le contenant, transvider le contenu dans un cylindre de 1000 ml et rincer le contenant avec de l'eau. Compléter à environ 970 ml avec de l'eau.
- Préparer un témoin contenant 100 ml de solution dispersante, 870 ml d'eau et 10 gouttes d'anti-mousse B.
- Immerger lentement l'hydromètre dans le témoin, laisser stabiliser et noter la lecture.

- Retirer l'hydromètre et le rincer à part.
- Fermer le cylindre avec un papier de paraffine et agiter par un mouvement d'inversion pendant 30 secondes en prenant soin de bien décoller le sol au fond du cylindre.
- Déposer le cylindre et noter l'heure.
- Immerger lentement l'hydromètre dans l'échantillon, laisser stabiliser et noter la lecture.
- Prendre une lecture après 30 secondes, 1 minute, 5 minutes, 30 minutes, 2 heures et 24 heures. Retirer doucement l'hydromètre après la troisième lecture, le rincer et l'essuyer.

Méthode de calcul

Densité des particules

$$D = K \cdot \sqrt{\frac{h}{t}}$$

D (mm) : densité

K : facteur lié au température

h (cm) : la longueur a partir du tableau pour une durée $t > 2\text{min}$

t : la durée

2 le pourcentage des particules :

$$N\% = (G_s/G_s - 1) (Y_w/W_s) (R - R_w) \cdot 100$$

G_s: densité du sol=2.65

Y_w:masse volumique d'eau 1g/cm³

W_s: masse du sol (50g)

R: lecture hydromètre de la suspension= 1000 (r-1)

R_w: lecture hydromètre du témoin = 1000(r_w-1)

Correction de la température

$$R_c = R + C_t + C_m - C_d$$

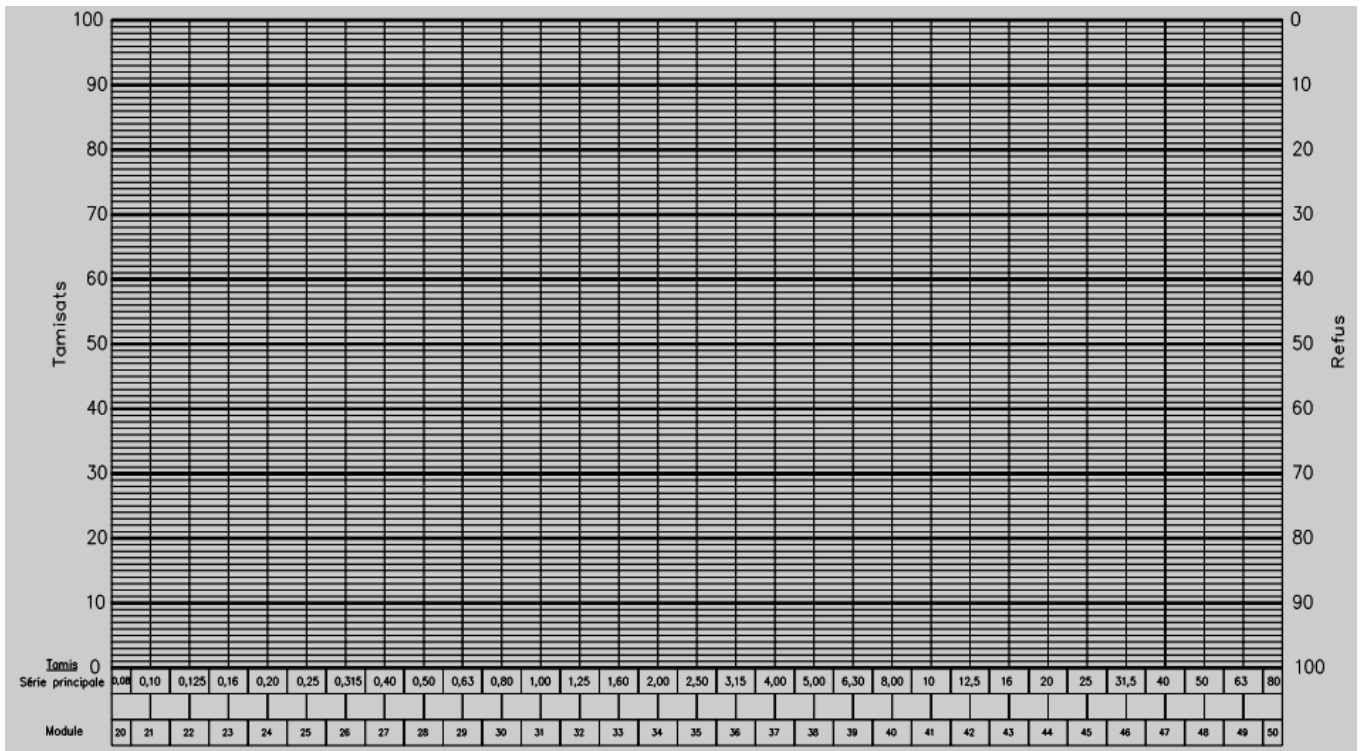
R_c : lecture corrigé

R : lecture hydromètre de la suspension

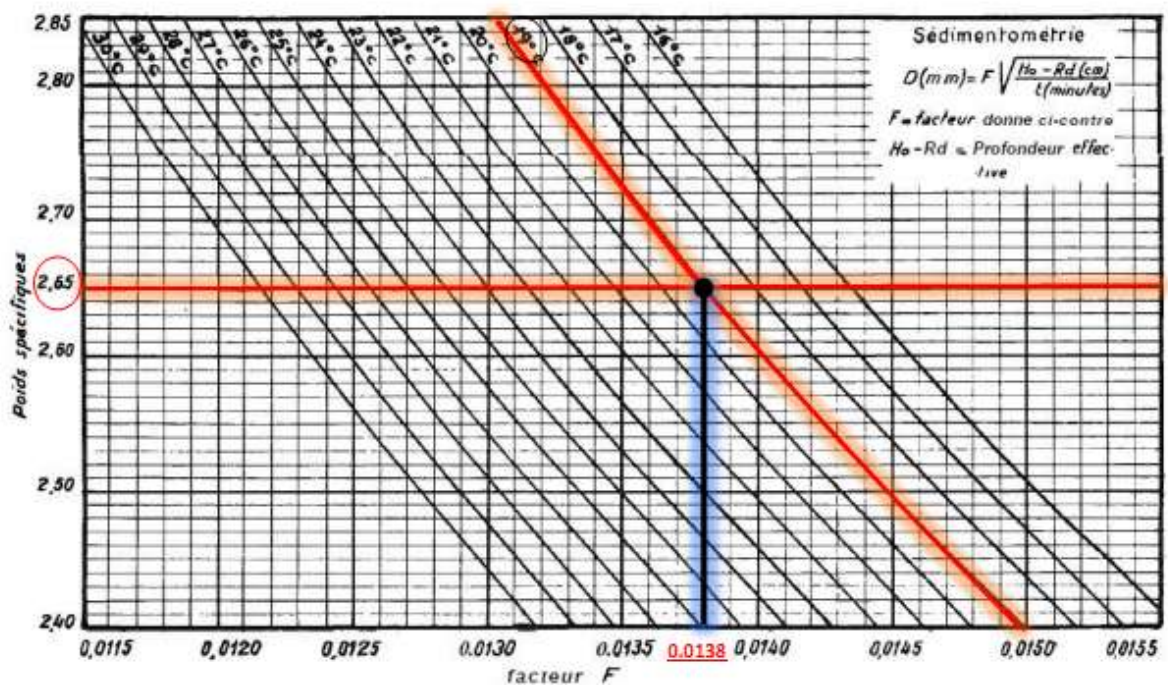
C_t : température au cours de l'essai

C_m : = -0.4 °C

C_d : = - 0.8 °C



F est un coefficient qui peut être calculé à partir de la courbe ci-dessous :



TPN°3 - Mesure le poids volumique des particules solides ρ_s

Matériel utilisé:

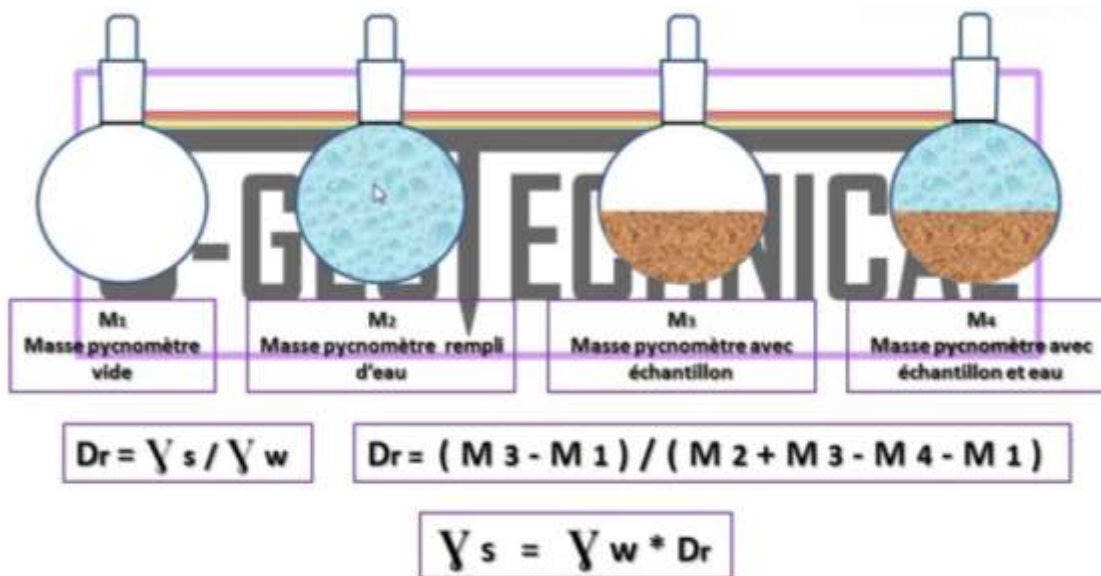
- 1/Une étuve
- 2/Un pycnomètre
- 5/plaque chauffante
- 6/Balance électronique.

Mode opératoire:

- 1-Peser le pycnomètre vide avec son tube capillaire soit m_1
- 2-Peser l'échantillon dans le pycnomètre soit m_2
- 3-Peser le pycnomètre contenant l'échantillon et l'eau soit m_3
- 4-Peser le pycnomètre plein d'eau soit m_4 . Afin qu'aucune bulle d'air ne reste accrochée aux particules on porte le pyc+éch+eau à ébullition pendant au moins 1hr.

On utilise la formule suivante : $\rho_s = \rho_w (m_2 - m_1)/(m_4 + m_2 - m_1 - m_3)$

Avec ρ_w masse volumique de l'eau=1000 kg/m³.



TPN°4 - Mesure de la teneur en eau W:

La teneur en eau est définie par le rapport du poids de l'eau contenue dans un échantillon de sol sur le poids de l'échantillon sec. Elle est mesurée en pesant l'échantillon humide (W_h) puis le repeser après l'avoir placé dans l'étuve à 105°C .

Soit $W = [(W_h - W_s) / W_s] \cdot 100$ (%)

TPN°5 Perméabilité des sols

1) Mesure de la perméabilité en laboratoire :

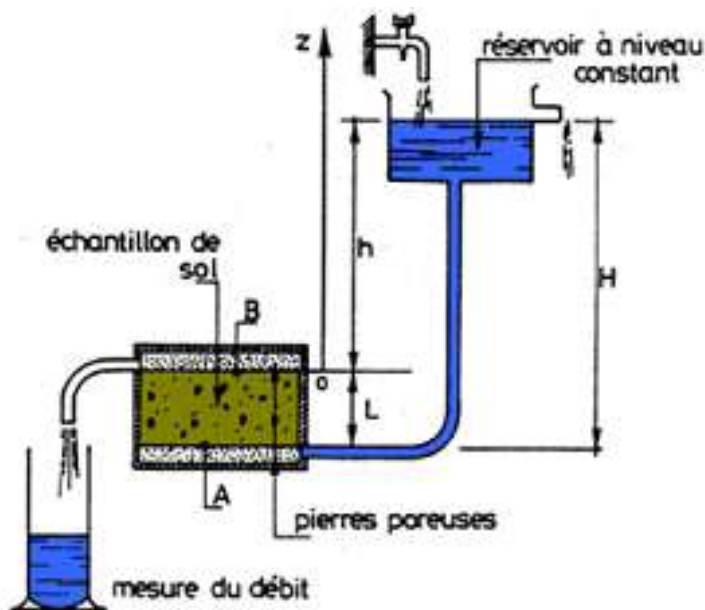
On utilise deux types d'appareils, appelés « **perméamètres** », suivant l'ordre de grandeur de la perméabilité du sol :

- Perméamètre à charge constante : pour les sols de grande perméabilité (sable)
- Perméamètre à charge variable : pour les sols de faible perméabilité (argile)

Le principe de ces appareils consiste à relier le débit (Q) de l'eau à la charge (H) constante ou variable.

a) Perméamètre à charge constante:

Dans ce cas, on mesure le débit qui traverse l'échantillon du sol pour pouvoir déduire la perméabilité (k)



$$v = \frac{q}{S} = ki = k \frac{\Delta h}{\Delta L} = k \frac{h}{L}$$

$$k = \frac{q}{S \cdot i} = \frac{q \cdot L}{S \cdot h}$$

b) Perméamètre à charge variable :

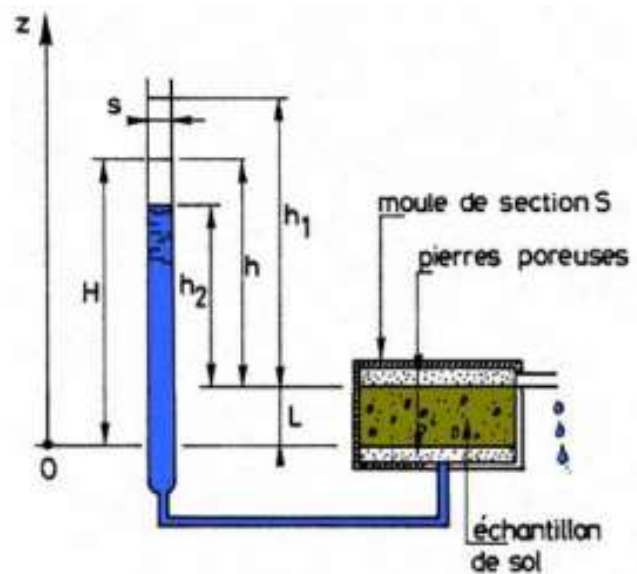
Dans le cas des sols à perméabilité très faible (Exp. $K < 10^{-5}$ m/s), il est très difficile de mesurer directement le débit de l'eau. Donc, on mesure le temps pour que le niveau de l'eau varie entre h_1 et h_2 (dans le tube). On a :

$$\frac{q}{s} = k \cdot \frac{h}{L} \rightarrow q = S \cdot K \cdot \frac{h}{L}$$

Par définition : le débit est le rapport du volume de l'eau au temps

$$q = \frac{V}{t} \rightarrow V = q \cdot t$$

Sachant que le volume d'eau qui traverse l'échantillon est égal à la diminution du volume d'eau dans le tube de section s et la diminution du volume d'eau est exprimée par $(-dh \cdot s)$



$$dV = q \cdot dt = -s \cdot dh$$

En remplaçant q :

$$S \cdot k \cdot \frac{h}{L} \cdot dt = -s \cdot dh$$

$$k \cdot dt = -\frac{s}{S} \cdot L \cdot \frac{dh}{h}$$

Après intégration :

$$k = \frac{s}{S} \cdot \frac{L}{t} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

TPN°6: pH du Sol

1- Intérêt

Le pH d'un sol est un paramètre qui n'a pas de réalité de terrain mais permet de comparer les sols entre eux et estimer ainsi leur réactivité. Il existe plusieurs méthodes de mesure du pH pour un échantillon de sol mis en suspension, elles diffèrent en particulier en fonction du rapport solide/solution et du solvant ajouté. Une détermination du pH au laboratoire permet d'orienter les extractions ou les dosages ultérieurs vers des méthodes adaptées aux sols acides, neutres ou basiques, ou encore, de les réaliser au pH même du sol (détermination des bases échangeables, de certains éléments

2- Domaine d'application

Le mesurage du pH de terres agricoles est réalisé à l'aide d'une électrode en verre dans une suspension diluée 1:5 (V/V) d'échantillon dans une solution de KCl 1M.

3. Principe

Une suspension de matrice solide est préparée dans 5 fois son volume d'une solution 1 M de KCl. Le pH est mesuré à l'aide d'un pH-mètre.

4. Préparation de l'échantillon

Conformément à la procédure S-I-1, les échantillons sont séchés à l'air ou dans une étuve ventilée à une température inférieure à 40 °C. Ils sont alors émottés et tamisés au travers d'un tamis de 2 mm.

5. Appareillages et matériels utilisés

pH-mètre équipé d'un système de contrôle et d'ajustement de la température, comportant une électrode en verre et une électrode de référence ou un dispositif d'électrodes groupées. Dans le cas de valeurs de pH > 10, il convient d'utiliser une électrode spécialement adaptée à cette gamme;

- Thermomètre d'une précision de 1 °C ;
- Agitateur
- Bouteille d'échantillonnage en verre ou en polyéthylène hermétiquement d'une capacité d'au moins 50 ml
- Cuillère de dosage d'une capacité connue, d'au moins 5.0 ml.
- Balance (précision de 0,1 g)

6. Réactifs utilisés

- Eau déminéralisée ayant une conductivité $\leq 0,2$ mS/m à 25°C et un pH > 5.6.
- Solution de KCl 1 M (dissoudre 74.5 g de KCl dans de l'eau et compléter à 1000 ml)
- Solution tampon commerciale ou préparée au laboratoire :

Dissoudre 10.21 g d'hydrogénophthalate de potassium ($C_8H_5KO_4$) dans de l'eau et diluer à 1000 ml

Dissoudre 3.39 g de dihydrogénophosphate de potassium (KH_2PO_4) et 3.53 g d'hydrogénophosphate disodique (Na_2HPO_4) dans de l'eau et diluer à 1000 ml

Dissoudre 3.80 g de tétraborate de sodium décahydraté ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) dans de l'eau et diluer à 1000 ml. Ces solutions tampons restent stables durant 1 mois si elles sont stockées dans des bouteilles en polyéthylènes.

7. Mode opératoire

7.1 Préparation de la suspension :

- Prélever à l'aide de la cuillère une quantité d'échantillon équivalent à 5 ml
- Transférer ce volume dans une bouteille d'échantillonnage et ajouter 5 fois son volume de la solution de KCl 1M
- Agiter ou mélanger à l'aide d'un mélangeur durant (1 heure) en recouvrant l'échantillon afin d'éviter l'entrée d'air.

7.2 Etalonnage du pH-mètre :

Etalonner le pH-mètre à l'aide des solutions tampon à disposition à une température de (20°C) ou à 25°C via une sonde de température le critère d'acceptation est fixé par la pente effective de la droite qui devra être entre 98.0 et 100 %.

7.3 Mesurage du pH :

- Mesurer la température de la suspension et veiller à ce que cette température soit identique à celles des étalons (pas plus de 1 °C de différence).
- Mesurer le pH dans le surnageant pendant ou immédiatement après une légère agitation de façon à faire la mesure dans une solution homogène.
- Relever le pH lorsque l'équilibre est atteint et noter les valeurs à la 2e décimale près (variation maximale de 0.02 unités sur une période de 5s).

TPN° 7 dosage du calcaire total (Calcimétrie)

Le calcaire total groupe les carbonates insolubles des sols, ceux du calcium et du magnésium. Il est mesuré par l'intermédiaire du calcimètre de Bernard. Il peut également être apprécié par le test d'effervescence

I- Principe

Sous l'action d'un acide fort, l'acide chlorhydrique, les carbonates se décomposent. Il en résulte un dégagement de gaz carbonique. La méthode au calcimètre de Bernard permet la mesure du volume de CO₂ dégagé, recueilli dans un tube gradué. Le test d'effervescence permet d'estimer, à l'œil nu, l'importance des bulles formées.

II- méthode au calcimètre de Bernard

Etape 1 : monter le calcimètre

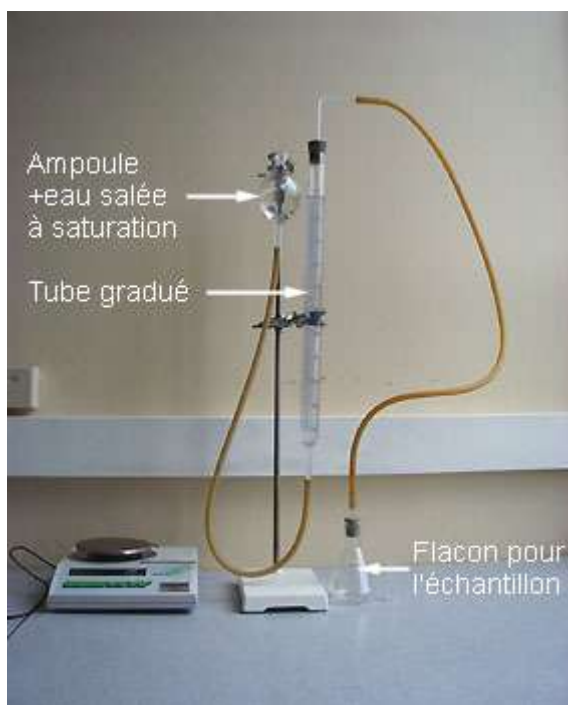
Un calcimètre permet de mesurer le volume de CO₂ dégagé par action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le carbonate de calcium (CaCO₃) d'un échantillon de sol ou de roche.

On peut fabriquer un calcimètre avec :

- une ampoule
- un tube gradué de 100 cm³
- un erlenmeyer de 100 cm³
- un petit tube en verre environ deux fois moins haut que l'erlenmeyer
- deux bouchons à 1 trou adaptés au tube gradué et à l'erlenmeyer
- 1,5 m de feuille anglaise

Prévoir :

- une balance à 0,01g pour peser l'échantillon.
- un portoir pour le petit tube
- une grosse pince à dissection
- un peu de pâte à modeler (non attaquée par l'acide)
- une pipette graduée
- HCl assez concentré



Etape 2 : Préparer la mesure

Préparer une solution saturée de NaCl (environ 1/4 de litre) ; la verser jusqu'à mi hauteur de l'ampoule.

Tarer la balance puis peser l'échantillon

Placer dans l'erenmeyer : l'échantillon du sol

Coller une boulette de pâte à modeler sous le petit tube.

A l'aide d'une pipette, verser dans le tube de l'HCl.

A l'aide d'une grosse pince, mettre en place le tube dans l'erenmeyer.

Boucher l'erenmeyer

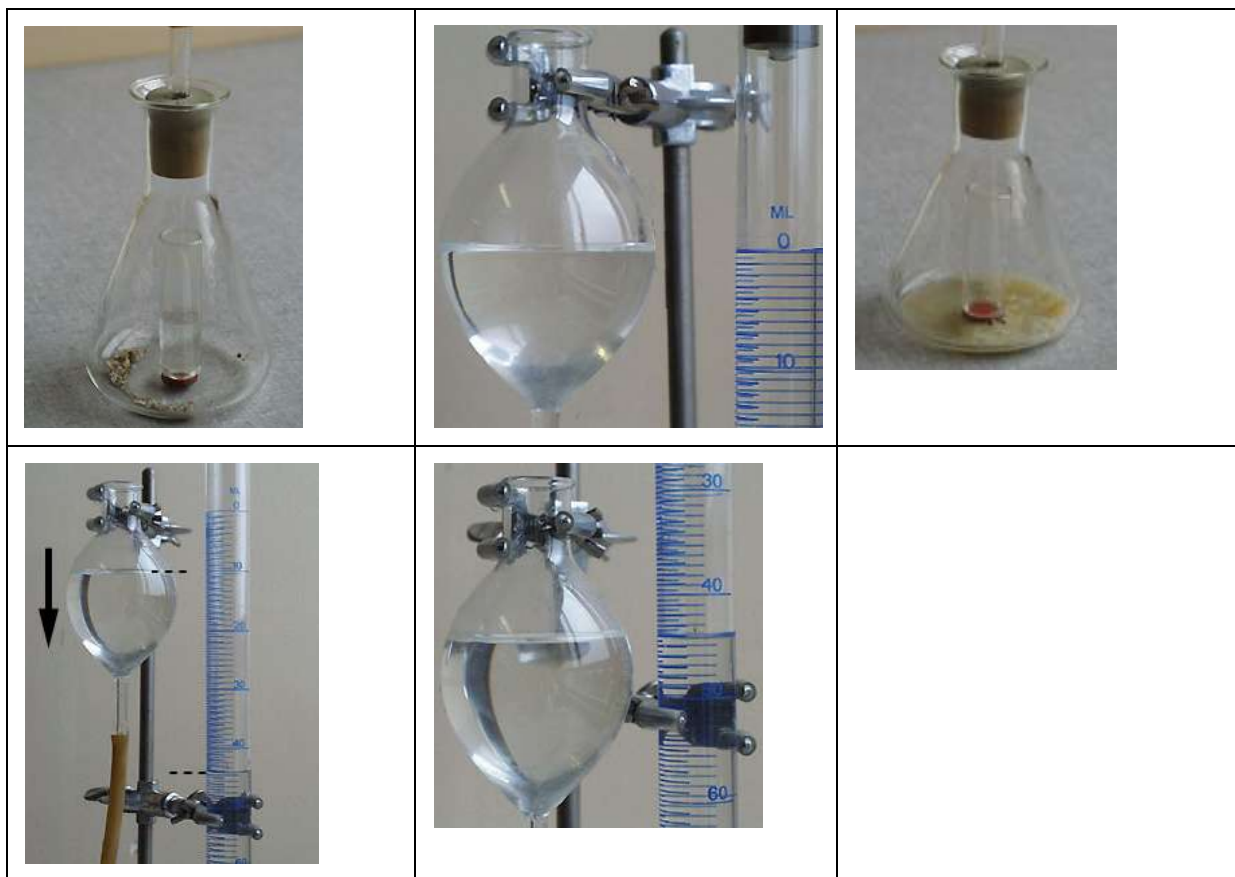
Modifier la hauteur de l'ampoule de manière à ce que l'eau salée soit au même niveau dans l'ampoule et le tube gradué.

Le contenu de l'erenmeyer sera alors à la pression atmosphérique.

Noter le niveau.

Incliner l'erenmeyer afin de faire couler l'acide sur l'échantillon.

Reposer l'erenmeyer et attendre la fin de l'effervescence.



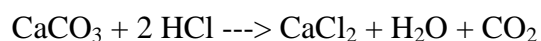
La pression dans le tube gradué est alors supérieure à la pression atmosphérique.

Il convient de rétablir la pression atmosphérique en descendant l'ampoule jusqu'à obtenir le même niveau dans l'ampoule et le tube.

Le CO₂ dégagé est maintenant à pression atmosphérique : on peut faire la mesure

Ouvrir l'erlenmeyer ; ajouter un peu d'acide sur l'échantillon. Vérifier que l'acide était bien en excès et que tout le CaCO₃ a été attaqué.

Etape 4 : le calcul de la teneur en CaCO₃



Si l'acide HCl est en excès, son action sur une mole de CaCO₃ (100g/mol) libère une mole de CO₂ (22,4 soit 22400 mL).

Connaissant le volume de CO₂ dégagé (niveau final - niveau initial), faire un produit en croix pour calculer la masse de CaCO₃ attaqué.

Ex : Masse de l'échantillon = 2 g

Niveau initial = 0 mL

Niveau final = 44 mL

Masse de CaCO ₃	Volume de CO ₂
100 g	22400 mL
x g	44 mL
Masse de CaCO ₃	Masse du sol
0,20 g	0,54 g
y g	100 g

$$x = (44 \times 100) / 22400$$

$$x = 0,20$$

$$y = (0,20 \times 100) / 2$$

$$y = 1$$

100 g du sol contiennent 1 g de CaCO₃ : cet échantillon du sol contient 10 % de calcaire.

TPN° 8 Dosage de la matière organique

a) Principe de la manipulation :

La teneur en matière organique est définie comme le rapport du poids des matières organiques sur le poids du sol sec. Elle se détermine par analyse chimique (destruction de la matière organique par du bichromate) ou par perte au feu. Cette opération se fait en mettant ces échantillons pendant 16 h dans un Four à 375 °C et la perte de poids après la calcination des échantillons nous permet de connaître les proportions pondérales de la matière organique.

b) Appareillage :

Dans cette manipulation on utilise plusieurs appareils lesquelles :

- Creuset en porcelaine numérotés.
- Etuve.
- Four à moufle.
- Tamis à 2 mm.
- Balance électronique de précision.
- Mortier en agate.
- Dessiccateur.

c) Mode opératoire :

- En commençant la procédure du dosage de la matière organique par le tamisage d'échantillons de sol on utilisant un tamis de 2 mm et on prend les tamisât.
- Sécher les échantillons pendant 16 h dans l'étuve à 55°C.
- On prend les creusets vides et on les numérote.
- On pesé ces creusets vides par une balance électronique de précision et on note leurs poids.

- Puis on ajoute 10g d'échantillons de sol séchés à ces creusets vides et on note les poids finals.
- On met les creusets avec les échantillons dans un four à moufle à 375°C pendant 16 heures.
- Après les 16 heures écoulées on sort les creusets et on les met dans un dessiccateur.
- Enfin on pesé les creusets après leurs refroidissement et on note les nouvelles poids.

d) Les résultats des analyses :

type de sol	numéro d'échantillons	P0	P1	P2
sol A	1	15,54	35,54	34.67
sol A	2	16,28	56,28	35.83
sol A	3	16,94	67,94	57.41

P0= poids des creusets vides ;

P1= poids finals = poids des creusets avec l'échantillon.

P2= poids des creusets + l'échantillon après la calcination.

Les calculs :

Le calcule de la matière organique présent dans nos échantillons se fait selon la procédure suivants :

Pour le premier échantillon de sol A :

On a P0= poids des creusets vides = 15.54g

Et P1= poids finals = poids des creusets avec l'échantillon = 35.54g

P2= poids des creusets + l'échantillon après la calcination = 34.67g

Donc le pourcentage de la matière organique est calculé par l'équation

suivant:

$$\% \text{ M.O.} = \frac{(P1 - P0) - (P2 - P0)}{(P1 - P0)} \times 100$$

$$\% \text{ M.O.} = \frac{(35.54 - 15.54) - (34.67 - 15.54)}{(35.54 - 15.54)} \times 100$$

$$\% \text{ M.O.} = 4.35 \% \text{ dans l'échantillon 1 de sol A.}$$

Références Bibliographie

Philipponnat G. & B. Hubert. 1979. Fondations et ouvrages en terre. Editeur Eyrolles - 6 ex 624.1 PHI

Sanglerat G., Olivari B., Cambou B. 1980. Problèmes pratique de mécanique des sols et de fondations, tomes 1,2, Ed, Dunod, paris, France.

Schlosser. F. 1992. Eléments de mécanique des sols. Editeur Presses de l'ENPC - 1992197 5 ex 624.1 SCH

Géotechnique - Recueil de normes

Tome 1 : Essais en laboratoire

Tome 2 : Essais sur site

Tome 3 : Justification des ouvrages. Exécution des travaux. Editeur AFNOR - 1999 1 ex 624.15 GEO