



المدرسة العليا للتكنولوجيا - العيون
+ΣΙCΗ +οοЖИИο+ | +ΣKISHΣ+ - И478
ÉCOLE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE - LAAYOUNE

Ecole Supérieure de Technologie, LAAYOUNE

Révision de cours (associée à l'examen)

Intitulé du module:
Géotechnique

Filière: Génie civil

Pr. Laila KHATRA

2019/2020

Chapitre 1: Caractéristiques physique, structure et classification du sol

I. Généralités et définitions

La géotechnique: est l'ensemble des activités liées aux applications de:

- La mécanique des sols;
- La mécanique des roches;
- La géologie de l'ingénieur.

La géotechnique s'appuie sur deux sciences

MÉCANIQUE DES SOLS ET DE ROCHES

Modélise leur comportement en tant que déformabilité et résistance des matériaux.

GÉOLOGIE

- ✓ Retrace l'histoire de la terre;
- ✓ Précise la nature et la structure des matériaux et leur évolution dans le temps.

MÉCANIQUE DES SOLS

Sols: Agrégats minéraux qui peuvent se désagréger en éléments de dimensions plus ou moins grandes sans nécessiter un effort considérable. Ils résultent de l'altération:

- Physique (ex: oxydation)
- Chimique (ex: variation de température, gel, etc.)
- Mécanique (érosion, vagues)

MÉCANIQUE DES ROCHES

Roches: Matériaux durs qui ne peuvent être fragmentés qu'au prix de très gros efforts mécaniques. (agglomérats de grains minéraux (Silice, calcaire, feldspath,...) liés par des forces de cohésion fortes et permanentes).

LES PRINCIPALES CATÉGORIES DES ROCHES

Les Matériaux constituant l'écorce terrestre peuvent être classés en trois catégories:

Les roches éruptives: constituées à partir du magma profond;



Les roches sédimentaires: formées après transport et dépôt, de débris d'altération physico-chimiques et mécaniques des roches préexistantes.



Les roches métamorphiques: qui proviennent de la transformation en place des roches préexistantes.



LES PRINCIPALES CATÉGORIES DES SOLS

L'étude des sols permet d'autre part de distinguer trois catégories:

-Les sols autochtones: se sont des sols qui n'ont pas subi de transport, ils résultent directement de l'altération du substratum rocheux qui recouvrent. Exemple typique : arène granitique ou (sable argileux grossier).

-Les sols résiduels: se sont des sols résultant de dégradation de la roche sous jacente et de roches ayant plus ou moins disparu par suite d'une décomposition intérieure. Ces sols présentent donc une parenté totale avec le substratum actuel. Ce sont essentiellement des sols à dominante argileuse.

-Les sols transportés: le transport se fait soit par:

-Le vent: loess, limon et sables;

-Les cours d'eau;

-Le glissement ou écoulement visqueux

(transport, limite dans l'espace, de formations résiduelles).

DOMAINE D'APPLICATION

La géotechnique joue un rôle essentiel dans l'acte de construire pour tous les travaux de bâtiment, de génie civil et d'aménagements.

On peut citer :

- Les fondations des ouvrages : bâtiments, ponts, usines, silos...;
- Les ouvrages de soutènement;
- La stabilité des pentes naturelles et des talus;
- Les terrassements : routes, autoroutes, voies ferrées...;
- Les V.R.D. et chaussées;
- Les tunnels et travaux souterrains;
- Les barrages et notamment digues et barrages en terre;
- Les ouvrages fluviaux, portuaires et maritimes;
- L'hydrogéologie et la protection de l'environnement.

INTÉRÊT DE LA GÉOTECHNIQUE

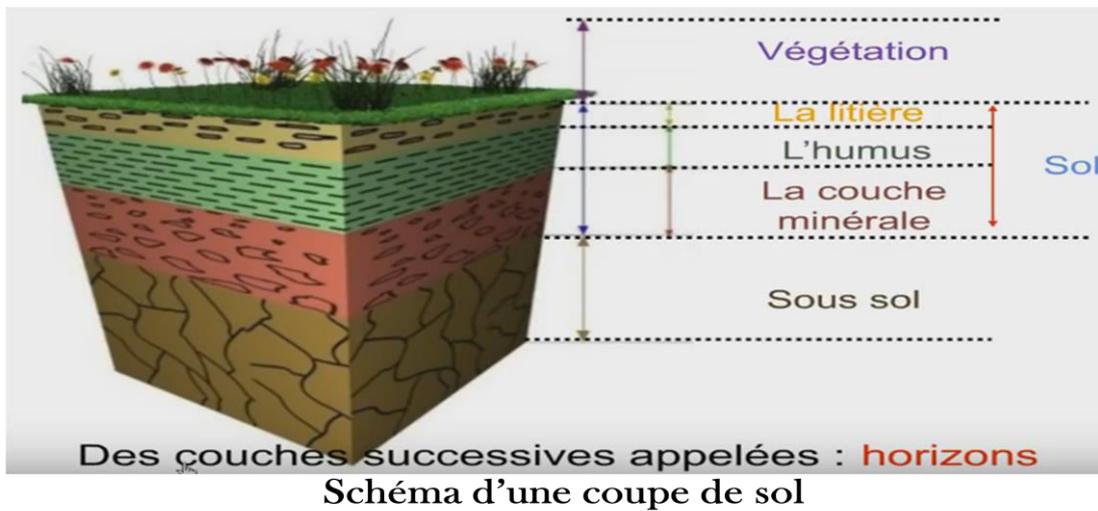
La société de nos jours a tendance à considérer tout accident dans le domaine du génie civil comme un échec de l'ingénieur, qu'il soit concepteur, vérificateur ou constructeur,

- L'ingénieur doit: -concevoir;
-calculer;
-construire;
-exploiter.
- Minimiser le risque en maximisant les avantages socio-économiques de ces ouvrages.

L'objet de l'étude géotechnique est de fournir aux constructeurs les caractéristiques mécaniques des sols dans l'emprise du projet et dans la zone intéressée par celui-ci, afin de permettre un calcul des éléments de la construction par application des lois de la mécanique des sols.

II. Processus géologique de formation des sols

II.1. Formation du sol

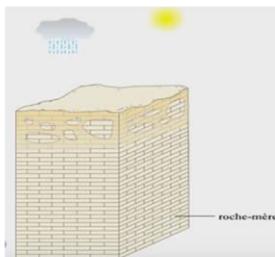


Les différentes couches qui constituent le sol:

- 1-Végétation
- 2-La litière
- 3-L'humus
- 4-La couche minérale
- 5-Le sous sol

II.2. Etapes de formation de sol

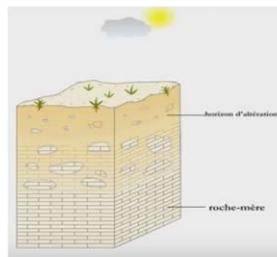
Etape 1



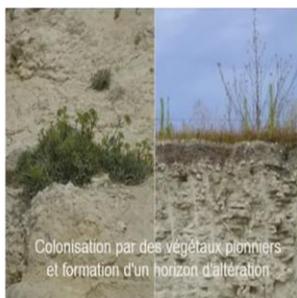
Désagrégation et altération chimique de la roche mère



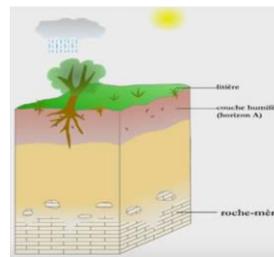
Etape 2



Colonisation par des végétaux pionniers et formation d'un horizon d'altération



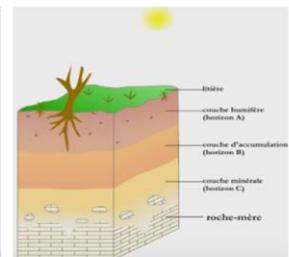
Etape 3



Formation de l'humus grâce à l'action des êtres vivants = enrichissement de la matière organique



Etape 4



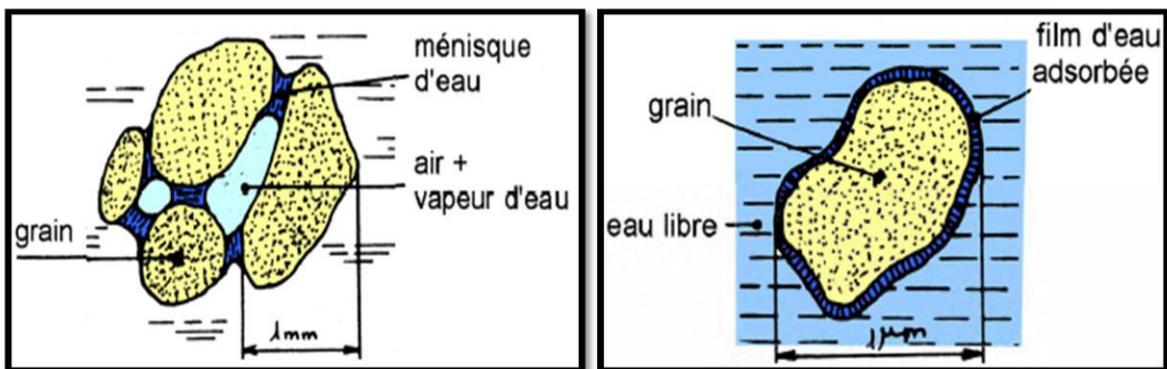
Formation de nouveaux horizons par migration et accumulation de matières



III. Différentes phases constitutives d'un sol

III.1. Eléments constitutifs d'un sol

- Le sol est constitué de:
 - Squelette solide (particules ou grains solides).
 - Vides ou interstices occupés par:
 - liquide (eau)
 - Gaz (air + vapeur d'eau)
- Lorsque l'eau remplit tous les vides, le sol est dit saturé.
- Lorsqu'il n'y a pas d'eau, le sol est dit sec.



Eléments constitutifs d'un sol

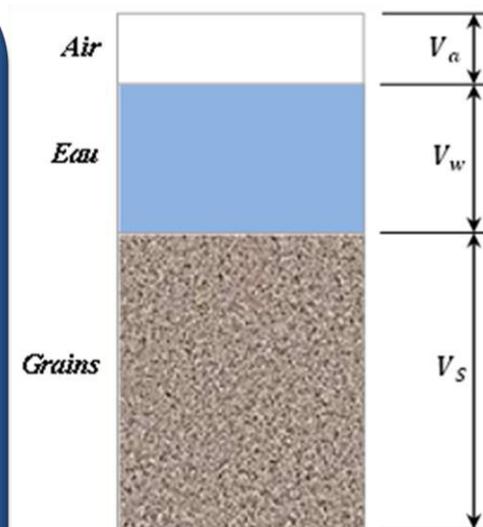
III.2. Phases constitutives d'un sol

On dit qu'un sol est constitué de trois phases:

-PHASE SOLIDE: matérialisée par les grains solides qui constituent le squelette du sol. Ces grains résultent de l'altération physico-chimique de la roche mère.

-PHASE LIQUIDE: représente l'eau contenant dans le sol. Cette eau peut être libre, capillaire ou adsorbée.

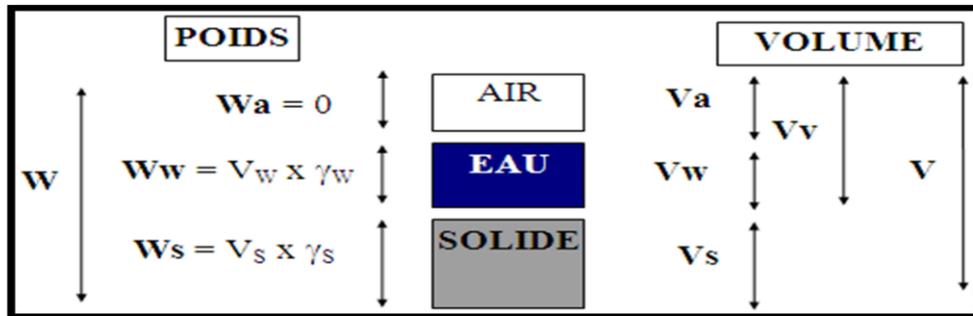
-PHASE GAZEUSE: dans le cas où le sol n'est pas saturé, cette phase est constituée par un mélange d'air et vapeur d'eau.



Phases constitutives d'un sol

IV. Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

IV.1. Description



Représentation schématique des trois phases d'un sol

Les paramètres définissant l'état d'un sol

W :	Poids de l'échantillon	V :	Volume de l'échantillon
W_w :	Poids de l'eau libre	V_a :	Volume de l'air
W_s :	Poids des grains solides	V_w :	Volume de l'eau
V_v :	Volume du vide entre les grains solides	V_s :	Volume du solide

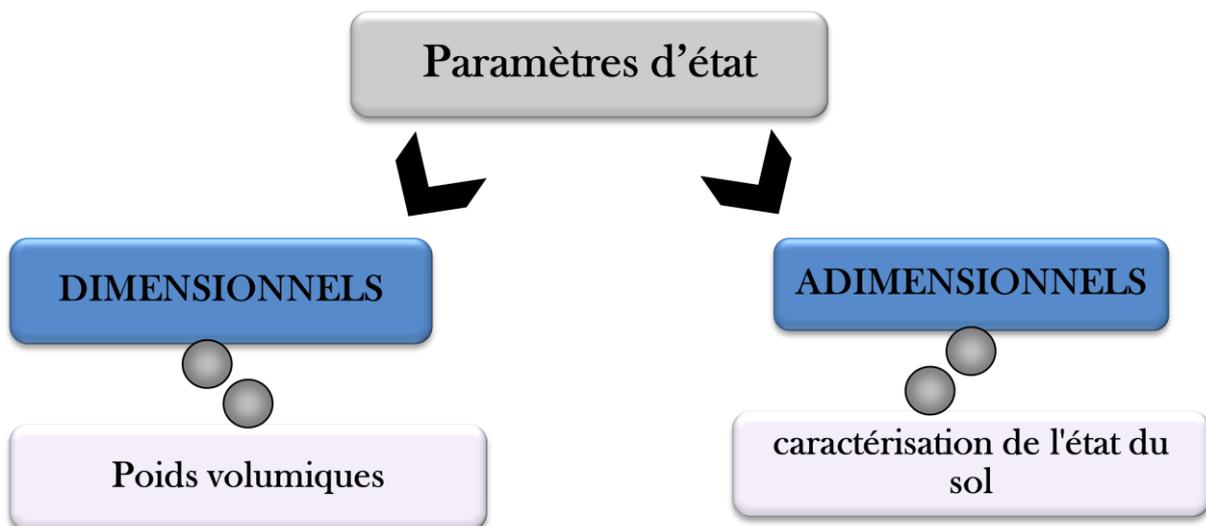
Où

$$V_v = V_w + V_a = V - V_s$$

$$W = W_s + W_w \text{ (avec } W_a = 0\text{)}$$

IV.2. Paramètres d'état des sols

Ils expriment la proportion relative de chaque phase constitutive d'un sol.



a) Les paramètres DIMENSIONNELS (ou poids volumiques (kN/m³)):

- Le poids volumique total du sol γ (ou poids volumique humide γ_h):

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

- Le poids volumique du sol sec (ou densité sèche): γ_d

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

- Le poids volumique des grains solides: γ_s

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

- Le poids volumique de l'eau: γ_w

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$$

- Le poids volumique 'déjaugé': γ'

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w$$

- Ordre de grandeur de ces paramètres:

L'unité du poids volumique est: N/m³ ou mieux kN/m³.

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

On prend souvent $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ d'où:

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} = 10 \cdot \text{kN} / \text{m}^3$$

b) Les paramètres ADIMENSIONNELS :

- La teneur en eau (ω):

$$\omega = \frac{W_W}{W_S} \times 100$$

- Le degré de saturation (S_r):

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \text{ ou } \frac{\omega}{\omega_{SAT}} \times 100$$

- L'indice des vides (e):

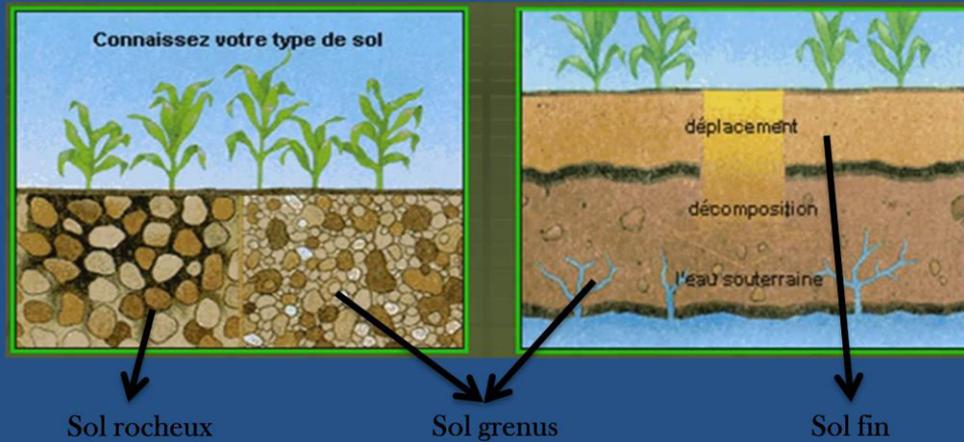
$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

- Le degré de porosité (n):

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (n < 1)$$

-L'indice des vides (e) et la teneur en eau (ω) donnent 2 catégories des sols:

- Les sols grenus (ou pulvérulents) dont le type est le sable, ont un comportement mécanique qui dépend presque uniquement de leur état de compacité (lâche ou serré).
- Les sols fins (ou cohérents) dont le type est l'argile, qui présentent de la cohésion, ont un comportement qui dépend en premier lieu de leur teneur en eau.



-L'état d'un sol peut être défini par:

-3 paramètres: (e, γ_s, ω) pour un sol non saturé.

-2 paramètres: (e, γ_s) pour un sol saturé.

Indice de densité: Pour donner une meilleure idée de l'état de compacité d'un sol grenu, on définit également un nouveau paramètre sans dimension, l'indice de densité ou densité relative:

$$I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

e_{\max} et e_{\min} sont les deux états de compacité extrêmes que l'on peut obtenir expérimentalement pour un sol donné. Ils sont déterminés par les essais de laboratoire strictement normalisés.

-Pour un sol lâche: I_d est voisin de 0.

-Pour un sol serré: I_d est voisin de 1.

-Dans le cas des sables: $0.40 \leq e \leq 1$

c) Relation entre les paramètres:

[1] $n = \frac{V_v}{V}$	[5] $e = \frac{V_v}{V_s}$	[9] $w = \frac{W_w}{W_s}$
[2] $n = \frac{e}{1+e}$	[6] $e = \frac{n}{1-n}$	[10] $w = e \cdot Sr \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$
[3] $n = 1 - \frac{V_d}{V_s}$	[7] $e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$	[11] $w = \frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$
[4] $n = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_s - \gamma_w}$	[8] $e = \frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w}$	[12] $w = Sr \cdot \gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$
[13] $Sr = \frac{V_w}{V_v}$	[14] $Sr = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \cdot \frac{w}{e}$	[15] $Sr = \frac{w}{w_{sat}}$ (γ_d constant)
[16] $\gamma = (1 + w)(1 - n) \cdot \gamma_s$	[17] $\gamma = \frac{1+w}{1+e} \cdot \gamma_s$	[18] $\gamma = (1 + w) \gamma_d$
[19] $\gamma = \gamma_d + n \cdot Sr \cdot \gamma_w$	[20] $\gamma = \frac{\gamma_s + e \cdot Sr \cdot \gamma_w}{1+e}$	[21] $\gamma = (1 - n) \cdot \gamma_s + n \cdot Sr \cdot \gamma_w$
[22] $\gamma_d = (1 - n) \gamma_s$	[23] $\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$	[24] $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$
[25] $\gamma' = (1 - n)(\gamma_s - \gamma_w)$	[26] $\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e}$	[27] $\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \cdot \gamma_d$

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

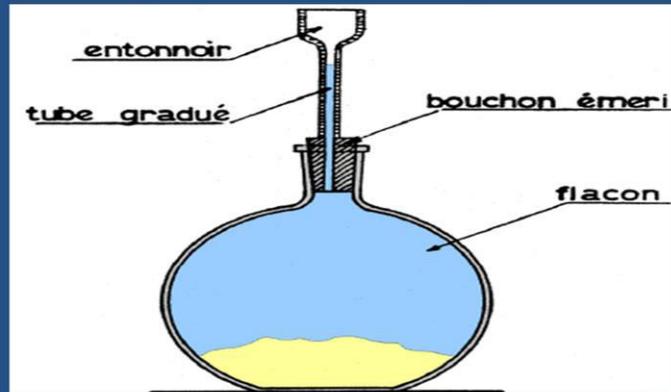
Mesures de laboratoires:

□ Détermination du poids volumique des grains solides γ_s

Cette mesure se fait à l'aide d'un pycnomètre. Un poids connu de sol W_s , sèche par passage à l'étuve à 105 °C jusqu'à poids constant ($W_w = 0$) est introduit dans un flacon (pycnomètre) contenant de l'eau distillée.

On en déduit par peser le volume d'eau déplacée par le sol V_s , d'où l'on tire:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \text{ en kN/m}^3$$



Pycnomètre

□ Détermination du poids volumique des grains solides

eau seulement *eau + sol*

à volume constant V_i

W_1 W_s W_2

$W_w = W_2 - W_s$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{W_s}{V_{\text{tot}} - V_w} = \frac{W_s}{W_1 - (W_2 - W_s)} \cdot \gamma_w$$

\downarrow \downarrow
 $\frac{W_1}{\gamma_w}$ $\frac{W_w}{\gamma_w}$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{W_1 + W_s - W_2} \cdot \gamma_w$$

□ Détermination de la teneur en eau ω

Elle se fait par deux pesées:

-L'une à la teneur en eau naturelle qui donne le poids W de l'échantillon humide.

-L'autre sec après passage à l'étuve à 105°C .

Le séchage se poursuit jusqu'à ce que l'échantillon du sol a un poids constant qui représente le poids sec W_s de l'échantillon.

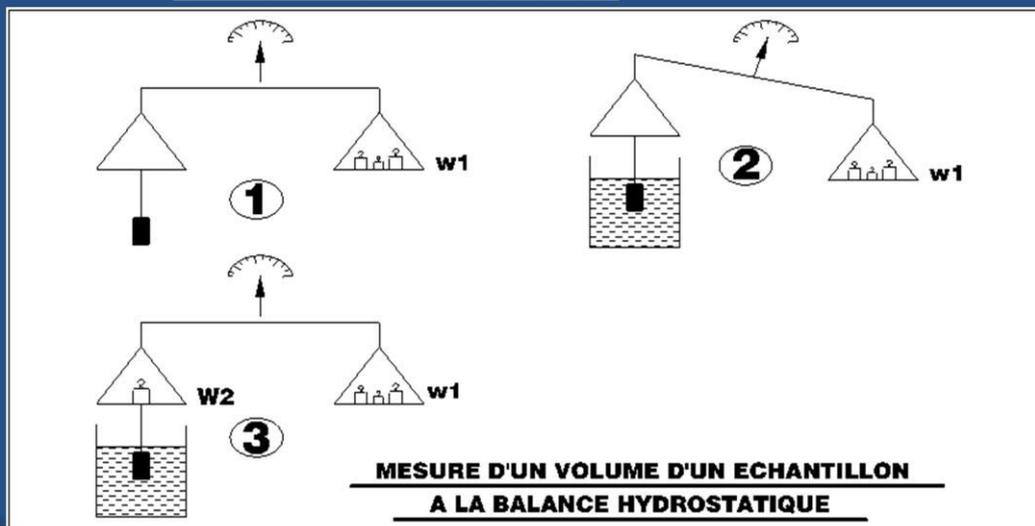
On en tire :

$$\omega = \frac{W - W_s}{W_s}$$

□ Détermination de l'indice des vides e

C'est une mesure délicate. Elle nécessite la détermination du poids W_s du sol séché à l'étuve et du volume total V de l'échantillon. Ce dernier se détermine généralement en mesurant la longueur d'une carotte de diamètre connu. On peut aussi opérer par déplacement de liquide à la balance hydrostatique après avoir paraffiner l'échantillon.

On en tire: $e = [V / (W_s / \gamma_s)] - 1$



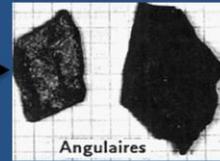
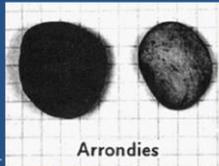
IV.3. Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

Les paramètres caractéristiques expriment la structure granulaire d'un sol.

• Forme des grains solides:

On peut distinguer généralement 2 catégories de formes:

- Les particules sphériques/cubiques (arrondies/ anguleuses:) cas des sols grenus (sables):



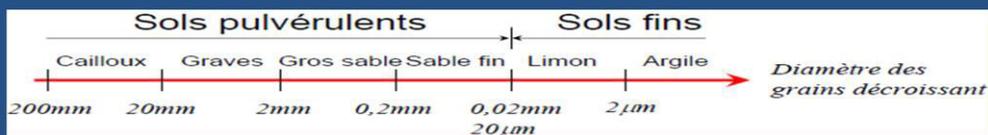
- Les particules en plaquettes: cas des sols fins (argiles):



• Dimensions des grains solides:

Supposons un sol dont les grains solides ont des dimensions peu différentes les unes des autres.

Suivant la taille des grains on définit les catégories de sols suivantes:



• La granulométrie d'un sol :

- On parle de la mesure de la taille des grains solides d'un sol

- L'étude granulométrique d'un échantillon de sol consiste à déterminer le pourcentage en masse des particules ayant une certaine dimension (différentes fractions granulométriques).

Elles sont représentées sur une courbe appelée courbe granulométrique.

→ Essais granulométriques:

- La courbe granulométrique: représentation des résultats des:

- Essais de tamisage (cas des sols grenus):

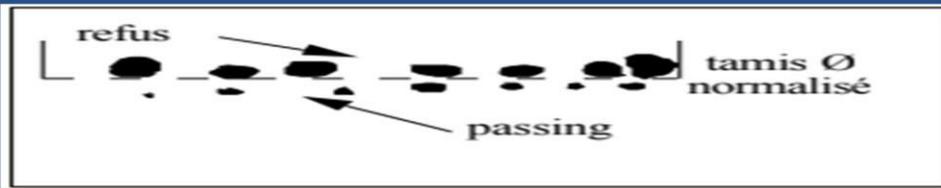
Il consiste à verser, après étuvage, un échantillon du sol sur une colonne de tamis d'ouvertures différentes (précisées par la norme utilisée) triés en croissance de bas vers le haut, et à peser à chaque fois la quantité retenue par un tamis.

• Le tamisât est le pourcentage en poids des grains qui passe au tamis considéré.

• Le refus est le pourcentage en poids des grains qui sont retenus au tamis considéré.

- L'essai de tamisage se réalise sur les particules ayant une grosseur supérieure à 80 micromètres.

- Essais de sédimentométrie (cas des sols fins): Pour les sols très fins, pour lesquels le tamisage n'est pas possible, la granulométrie est déterminée par sédimentométrie.



Distribution des grains obtenus après l'essai de tamisage

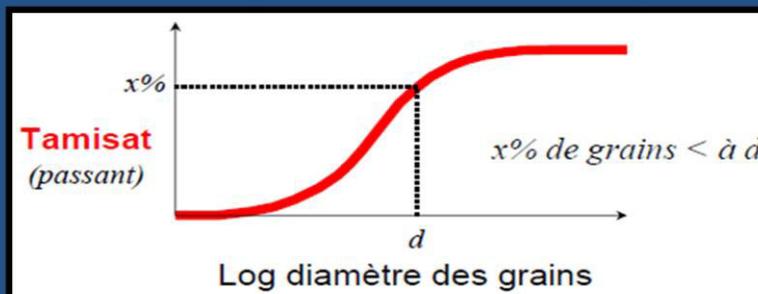


Colonne de tamis d'ouvertures différentes



→ La courbe granulométrique:

La courbe représente le poids des tamisats cumulés (échelle arithmétique) en fonction du diamètre, D, des particules solides (échelle logarithmique).



-A partir de ces refus, on calcule pour chaque tamis le pourcentage massique du passant :

$$\% \text{ passant} = \left(1 - \frac{\text{masse retenue}}{\text{masse totale d'échantillon}} \right) \times 100 \text{ [\%]}$$

Pour catégoriser une courbe granulométrique et identifier le sol, on définit deux caractéristiques (D_x et y):

D_x = y : Signifie que la maille laissant passer un tamisât cumulé de x% a une dimension égale à y.

Exemple: D₆₀ = 4 signifie qu'au tamis de 4 mm, le tamisât cumulé vaut 60%.

La caractérisation de la granulométrie:

-La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par un:

• Coefficient d'uniformité ou coefficient de Hazen:

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

Où D_p est le diamètre de l'ouverture du tamis au travers duquel passe P% (en poids) des grains.

D_{10} est appelé diamètre efficace (C'est le diamètre correspondant à 10 % de passant).

-Pour $C_u > 2$, la granulométrie est dite étalée.

-Pour $C_u < 2$, la granulométrie est dite uniforme ou serrée.

• Coefficient de courbure:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

• Module de finesse de sable:

$$Mf = 10^{-2} \sum r$$
 où r représente:

le refus mesuré sur les tamis de modules 25 (0,16 mm), 26 (0,315 mm), 29 (0,63 mm), 32 (1,25 mm), 35 (2,5 mm), et 38 (5 mm) exprimé en %.

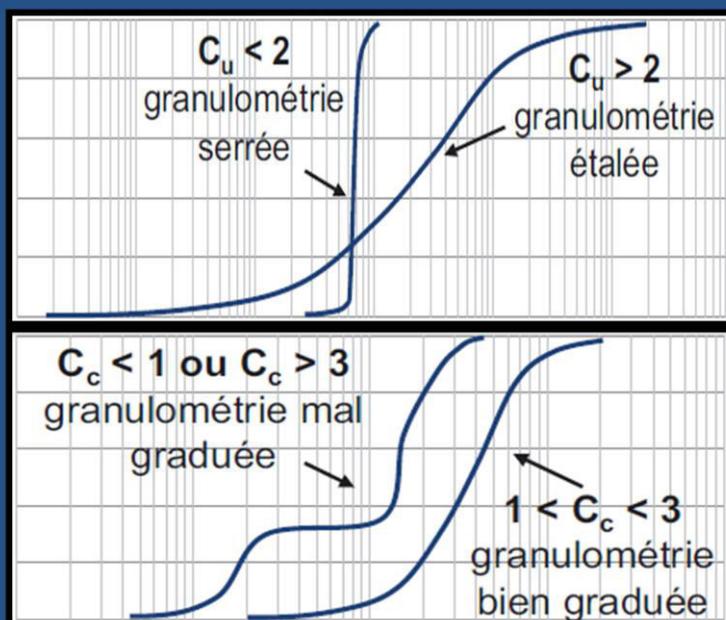
Le module de finesse est exprimé en pourcentage.

Conventionnellement :

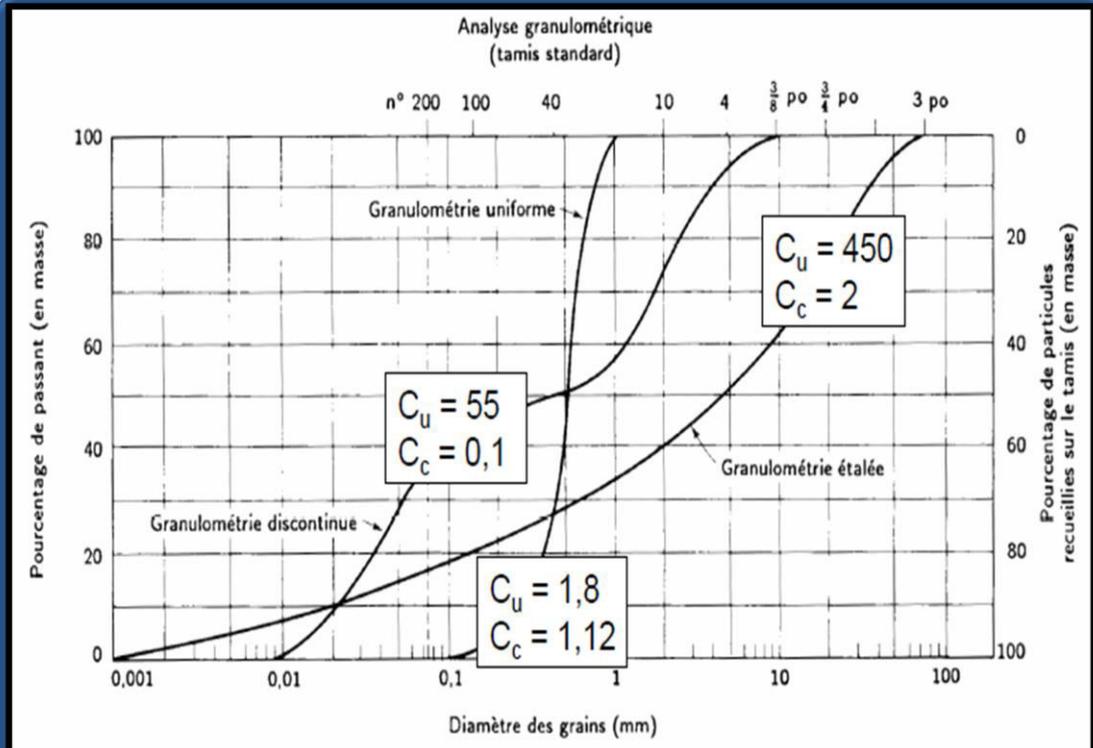
-Si $Mf < 2,2$ % le sable est dit fin -Si $Mf > 2,8$ % le sable est dit grossier.

-Lorsque certaines conditions sur C_u et C_c sont satisfaites, le sol est dit bien gradué c'est à dire que sa granulométrie est bien étalée, sans prédominance d'une fraction particulière.

-Quand sa granulométrie est discontinue avec prédominance d'une fraction particulière, il est dit mal gradué.



Interprétation des coefficients C_u et C_c



Un exemple d'une analyse granulométrique (courbe granulométrique)