

PLAN DE LA PREMIÈRE PARTIE

- Définition du sol
 - Définition de la mécanique du sol
 - Définition des origines du sols
 - Application de la mécanique du sol
 - - Fondations d'ouvrages
 - - Ouvrages mixtes
 - - Ouvrages en sol
 - - Milieux naturels
 - Structure du sol
 - **Caractéristiques physiques du sol**
 - **Exercices!!**
- 

DÉFINITION D'UN SOL : ROCHE

- En géotechnique, une roche est un agrégat naturel massif de matière minérale.
 - En géologie, on appelle roche tout élément constitutif de l'écorce terrestre.
 - Cela recouvre donc les roches au sens géotechnique, mais aussi le sol, le pétrole, l'eau des nappes, etc.
- 

DÉFINITION D'UN SOL : ROCHE ET SOL

- Au point de vue géotechnique, les matériaux constituant la croûte terrestre se divisent en deux grandes catégories : les roches et les sols.
- **Les roches (silice, calcaire, feldspath, ...) sont des matériaux durs qui ne peuvent être fragmentés qu'aux prix de gros efforts mécaniques.**
- **Les sols, au contraire, sont des agrégats minéraux qui peuvent se désagréger** en éléments de dimensions plus ou moins grandes sans nécessiter un effort considérable. Ils résultent de l'altération chimique (oxydation, ...), physique (variation de température, gel, ...) ou mécanique (érosion, vagues, ...) des roches.

DÉFINITION D'UN SOL

- Sol:
- Le sol est défini par opposition au mot roche, dans sa définition géotechnique. **C'est un agrégat naturel de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère.**
- **Le sol est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches.** On conçoit donc que la limite entre un sol et une roche altérée ne soit pas définie nettement.
- **Le sol est un matériau meuble**, ce caractère étant fondamental. Il ne suffit cependant pas à définir un sol naturel car certains matériaux produits par l'homme présentent aussi ce caractère. Par exemple les sous produits miniers et les granulats concassés (sable, gravier, ballast...) sont aussi des matériaux meubles.

DÉFINITION D'UN SOL

- Sol:
- Le mécanicien des sols étudie donc aussi bien des sols naturels que des matériaux fabriqués artificiellement à partir de sols ou de roches et présentant un caractère meuble.



DÉFINITION D'UN SOL

- **A retenir**
- **Qu'appelle-t-on sol ?**
- - Les sols peuvent être définis comme des agrégats dans lesquels les particules sont faiblement liées et peuvent être séparées par une action mécanique légère
- - Un sol en place est constitué de grains solides baignant dans l'eau, dans l'air ou dans un mélange (eau + air)



DÉFINITION D'UN SOL: CONCLUSION

- un sol peut contenir des fragments de roche, des particules d'argile et des matières organiques
- les vides entre ces différents éléments, généralement appelés **pores ou interstices** sont remplis d'eau et d'air
- si les vides ne contiennent pas d'eau, le sol est **sec**
- si tous les vides sont remplis d'eau, le sol est **saturé (sol sous la nappe)**,
- si les vides sont remplis d'eau et d'air le sol est **non saturé**

DÉFINITION DE LA MÉCANIQUE DU SOL

- La mécanique des sols est l'application des lois mécaniques et hydrauliques au matériau sol.
- Comparé aux nombreux autres matériaux étudiés en mécanique, les bétons, les aciers, les plastiques, le bois... , **le sol présente deux originalités.**
- **C'est tout d'abord un milieu discontinu qu'il faudra donc étudier à la fois dans sa globalité et dans sa composition élémentaire.**
- **D'autre part, c'est un matériau triphasique formé de grains solides, d'eau et d'air. Nous verrons que les phases non solides jouent un rôle fondamental.**

DÉFINITION DE LA MÉCANIQUE DU SOL

- **Qu'appelle-t-on la mécanique des sol ?**
- - La mécanique des sols est l'étude des propriétés physiques, hydrauliques et mécaniques des sols en vue de leur application à la construction.
- - La mécanique des sols est donc une science appliquée, appelée aussi **géotechnique**, bien que la géotechnique soit une science beaucoup plus vaste, qui englobe quatre disciplines : la **mécanique des sols, la mécanique des roches, la géologie de l'ingénieur et l'étude des matériaux locaux.**

DÉFINITION DE LA MÉCANIQUE DU SOL

- Le travail d'un mécanicien de sol, ou d'un géotechnicien, se joue en effet sur un ou plusieurs des trois volets:
- - Déformations des sols
- - Résistance au cisaillement des sols
- - Problèmes reliés à l'eau
- La mécanique des sols puise souvent dans d'autres disciplines connexes. On citera:
- la mécanique des roches, la géologie, géomorphologie, tectonique , minéralogie , pédologie

DÉFINITION DE LA MÉCANIQUE DU SOL

- La mécanique des sols est une science jeune. Les premiers fondements peuvent être attribués à COULOMB (1773), mais TERZAGHI (1883-1963) a véritablement initié la mécanique des sols moderne (1936).
- La mécanique des roches est une science encore plus jeune dont on peut dater les réels débuts dans les années soixante, en particulier suite à la catastrophe de Fréjus (barrage de Malpasset).

L'ÉVOLUTION DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

Siècle	Auteur	Théorie
18 ^{ème}	Coulomb	Résistance au cisaillement
19 ^{ème}	Collin	Rupture dans les talus d'argile
	Darcy	Écoulement de l'eau à l'intérieur du sable
	Rankine	Pression des terres sur les murs de soutènement
20 ^{ème}	Gregory	Drainage horizontal, remblai compacte avec contrefort pour stabiliser la pente des tranchées de voies ferrées
	Atterberg	Limites de consistance de l'argile
	Terzaghi	Premier manuel moderne de mécanique des sols
	Casagrande	Essais sur la limite de liquidité

SCIENCES PROCHES DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

- Par certains aspects, la mécanique des sols est proche de la mécanique des milieux continus qui étudie de nombreux matériaux comme l'acier, le bois, les bétons, les plastiques dont la plupart sont artificiels et donc de constitution bien connue.
- Par d'autres aspects, elle est proche des disciplines qui étudient les milieux minéraux naturels : la géologie, l'hydrogéologie, la mécanique des roches. La géotechnique regroupe ces dernières disciplines.

SCIENCES PROCHES DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

- Suivant le but recherché, on considère :
- a) **La géologie**
- La géologie étudie les matériaux constituant la partie observable du globe terrestre, ainsi que l'ordre suivant lequel ces matériaux sont réparties dans le temps et dans l'espace. Son but essentiel est l'histoire de la terre et son évolution.
- b) **La pédologie**
- La pédologie étudie spécialement la couche supérieure de l'écorce terrestre utilisée par les racines des plantes. Elle met en lumière le rôle des constituants du sol fréquemment négligés par les géotechniciens : les matières organiques et la matière vivante (bactéries).
- c) **La mécanique des sols ou géotechnique**
- La mécanique des sols est l'étude des propriétés mécaniques, physiques et hydraulique des sols en vue de leur application à la construction.

ORIGINE DES SOLS

Introduction

- ▶ La formation d'un sol est un processus très lent, appelé **pédogénèse**
- ▶ La **pédologie** est la science de l'étude de la formation et de l'évolution des sols sous l'action naturelle
- ▶ Un sol est un **matériau meuble issu de la décomposition des roches** par les agents atmosphériques et l'activité biologique
- ▶ La distinction entre roches et sols est **arbitraire**

Roches : compactes, dures, résistantes

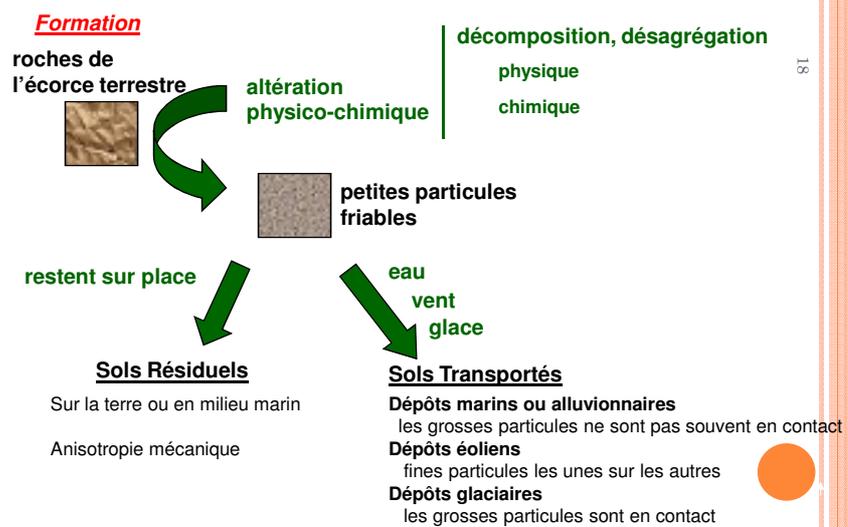
→ Fragmentation nécessite très gros efforts mécaniques

Sols : meubles, déformables

→ Facilement séparables en grains

17

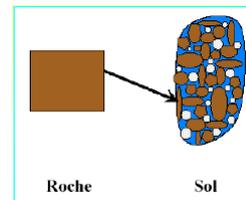
ORIGINE DES SOLS



18

ORIGINE DES SOLS: FORMATION DES SOLS

- **D'où proviennent les sols ?**
- Tout simplement des roches, mais ils peuvent contenir aussi des matières organiques
- Les sols ont deux origines principales :
- - la **désagrégation des roches par altération mécanique ou physicochimique** sous l'effet des agents naturels
- - la **décomposition d'organismes vivants : végétaux** (tourbes) ou animaux (craies).



Transformation de la roche en sol



ORIGINE DES SOLS

Formation

ALTERATION PHYSIQUE

10

Désagrégation	Les variations de température entre le jour et la nuit sont suffisantes pour faire dilater et contracter la roche, ce qui la fissure et la casse.
Gélifraction	Semblable à la désagrégation, l'eau joue ici un rôle primordial. Lorsqu'elle est présente dans les fissures, l'eau qui gèle augmente son volume et fait éclater la roche.
Action des racines	Les racines qui s'insinuent dans les fissures avancent et grossissent au fur et à mesure que la plante croît. Cela élargit les fentes et casse la roche.
Action du vent	En poussant de la poussière et d'autres débris, le vent arrache des morceaux de roche.



ORIGINE DES SOLS

Formation

ALTERATION CHIMIQUE

21

Hydrolyse	Le CO ₂ contenu dans l'eau s'attaque aux roches par réaction chimique ce qui laisse s'échapper des ions qui sont à leur tour rendus solubles dans l'eau.
Oxydation	L'oxydation est une réaction avec l'air et l'eau qui entraîne une dissociation des cristaux à l'intérieur de la roche.
Hydratation	Il s'agit d'une réaction avec l'eau qui s'infiltré dans les roches. Cette action s'accompagne toujours d'une augmentation de volume.
Dissolution	Phénomène souvent observé. Cela arrive lorsqu'une roche se dissout ou se solubilise dans l'eau.
Carbonatation	Autre réaction avec le CO ₂ qui est facilement soluble dans l'eau rend celle-ci acide. Cet acide attaque les roches et rend la dissolution plus facile

ORIGINE DES SOLS

Evolution

CHANGEMENTS DE STRUCTURE

22

Différents facteurs peuvent intervenir dans les modifications de structure observées depuis la formation jusqu'à l'utilisation du sol :

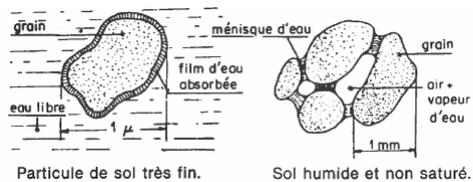
- ▶ Le temps : processus de diffusion ou réactions chimiques
- ▶ Les écoulements d'eau et les lessivages
- ▶ La cimentation des particules par précipitation de sels insolubles sur les surfaces de contact
- ▶ L'érosion par les agents atmosphériques (succession d'humidification-séchage, gel-dégel)
- ▶ La consolidation

STRUCTURE DES SOLS

Un échantillon de sol est constitué de trois phases :

- une phase gazeuse,
- une phase liquide,
- une phase solide.

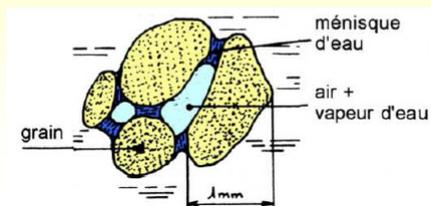
23



STRUCTURE DES SOLS

squelette solide	<i>effet de la taille</i>
+	
eau	<i>libre, capillaire, adsorbée</i>
+	
gaz	<i>air + vapeur d'eau</i>

24



STRUCTURE DES SOLS

1.2.1 Constitution

GAZ

- ▶ air dans sol sec
ou
air + vapeur d'eau dans sol humide

on négligera son poids par rapport aux autres constituants (eau, grains solides)
- ▶ Si tous les vides sont remplis d'eau : le sol est dit **saturé**

Sinon : sol **non saturé** (degré de saturation)

En Génie Civil, le gaz contenu dans le sol est généralement de l'air pour les sols secs ou un mélange d'air et de vapeur d'eau pour les sols humides.
Lorsque tous les vides sont remplis d'eau le sol est dit saturé.

25

STRUCTURE DES SOLS

Dans les **sols non saturés**, la **phase gazeuse est présente dans tout ou** partie des pores sous forme d'un mélange d'air, de vapeur d'eau, de gaz carbonique et d'autres gaz

STRUCTURE DES SOLS

Au sein d'un échantillon de sol fin (dimensions $< 2\text{m}$), on distingue plusieurs catégories d'eau :

-l'eau de constitution qui rentre dans la composition chimique des feuillets.

-l'eau liée ou eau adsorbée qui constitue un film autour de chaque grain. Elle n'est pas mobile et ne s'évacue qu'à des températures très élevées ($< 300^\circ\text{C}$)

- l'eau Interstitielle qui peut être soit l'eau libre soit l'eau capillaire. L'eau libre a la faculté de circuler librement entre les grains ; l'eau capillaire est une partie de l'eau libre qui remonte par capillarité entre les grains. L'eau interstitielle s'évapore complètement si l'échantillon de sol est porté à une température supérieure à 100°C .

STRUCTURE DES SOLS

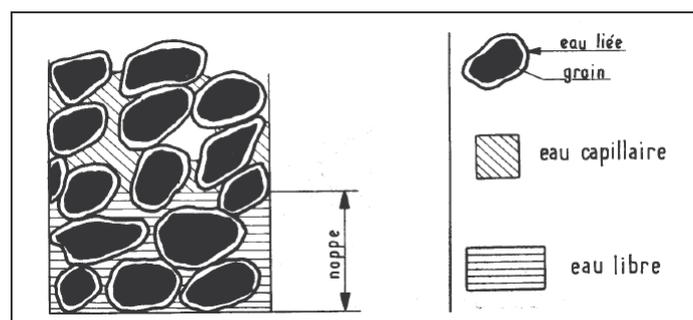


Fig. 1.1. Différents états de l'eau dans les sols

Lorsque le sol est humide et non saturé, l'eau libre est en général concentrée aux points de contact entre les grains. Elle est retenue à ces endroits par des forces de capillarité qui créent entre les grains des forces d'attraction.

STRUCTURE DES SOLS

1.2.1 Constitution

EAU

29

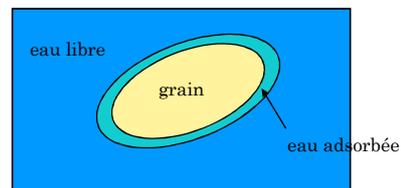
on distingue plusieurs catégories d'eau dans un sol à grains très fins

- **Eau libre,**

qui peut circuler entre les grains et qui s'évapore complètement lorsque le sol est porté à une température légèrement supérieure à 100°C

- **Eau adsorbée,**

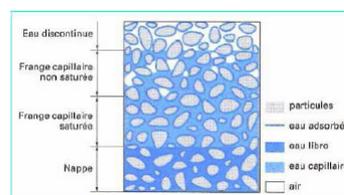
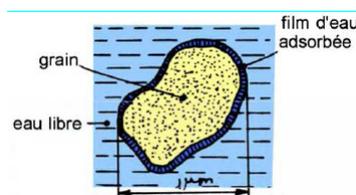
qui constitue un film autour de chaque grain, jouant le rôle de lubrifiant entre les grains
Cette eau présente des propriétés assez différentes de celles de l'eau libre : elle n'est pas mobile, sa viscosité est importante, elle ne s'évacue qu'à température élevée (vers 300°C)



STRUCTURE DES SOLS

On distingue quatre catégories d'eau:

- **Eau de constitution**
- **Eau libre**
- **Eau capillaire**
- **Eau liée ou absorbée**



STRUCTURE DES SOLS

1.2.1 Constitution

SQUELETTE SOLIDE

31

▶ Lorsque le sol est le résultat d'une **désagrégation physique ou mécanique** d'une roche, les grains du sol sont constitués des **mêmes minéraux que la roche mère**. Ils ont en général des **dimensions > 2mm** et une **forme arrondie**.

▶ Lorsque le sol est aussi le résultat d'une **attaque chimique** de la roche, les grains du sol n'ont **pas la même structure cristalline que la roche mère**. L'altération chimique produit des grains de **taille < 2mm**.

Les plus petites particules qui peuvent être ainsi formées sont les **argiles** qui possèdent un **comportement extrêmement complexe**.

Ce sont des petites particules plates en forme de feuillet entre lesquelles il existe des forces d'attraction (de type Van der Waals) importantes.

▶ Le sol peut également contenir des particules solides de **matière organique** (ex : tourbe).

STRUCTURE DES SOLS

○ La phase solide

○ On a vu que les sols résultent de l'altération physique ou mécanique des roches. On conçoit aisément que les grains solides aient la même constitution minéralogique que la roche mère. Ils ont en général des dimensions supérieures à 2m .

○ Les sols de dimension inférieurs à 2m résultent d'attaques chimiques qui se sont superposées à l'altération physique ou mécanique. Ces processus chimiques sont la dissolution sous l'action de l'eau, la combinaison et la recristallisation. Il en résulte que les particules d'un sol fin n'ont pas la même structure cristalline que la roche mère. Ces plus petites particules ainsi formées constituent ce que l'on appellera désormais les argiles. Ces derniers matériaux ont un comportement complexe qui nécessite pour bien être compris une étude à l'échelle moléculaire qui dépasse largement le cadre de ce cours

STRUCTURE DES SOLS

o La phase solide

Roche *la désagrégation physique et mécanique des roches consolidées donne*

des fragments de roche de **même composition que la roche mère** : gravier, sable, limon

Roche *la décomposition physico-chimique de la roche en place ou des fragments*

de roche donne **Des nouveaux composés : argiles**

Fractions du sol suivant la dimension des grains			
Dimension D des particules	Fraction du sol	Forme des grains	Nature des minéraux
$D > 80 \mu\text{m}$	grenue	régulière	minéraux d'origine
$2 \mu\text{m} < D < 80 \mu\text{m}$	fine	plaquette ou disque	
$D < 2 \mu\text{m}$	très fine ou argileuse		minéraux d'origine ou néo-formés

DOMAINES D'APPLICATION DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

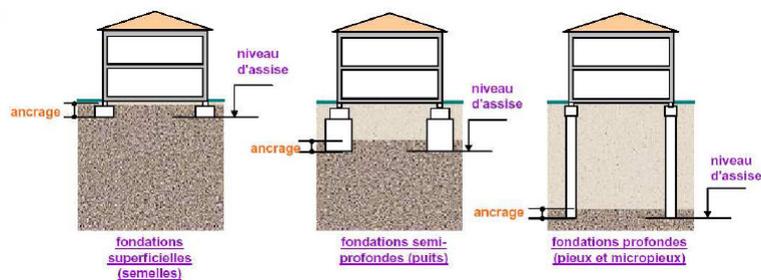
- o Les domaines d'application de la mécanique des sols sont nombreux et variés. Ils concernent la profession des travaux publics, ainsi que celle du bâtiment.
- o - **Fondations d'ouvrages ou bâtiments (fondation superficielles et profondes)**
- o - **Ouvrages mixtes (murs de soutènement, parois moulées,...)**
- o - **Ouvrages en sol (routes, voies ferrés, barrages, digues de bassins en terre,...)**
- o - **Milieus naturels (versants, berges de cours d'eau ou de retenues,...)**

DOMAINES D'APPLICATION DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

- **Fondations d'ouvrage ou de bâtiment**
- Dans l'étude des fondations, le sol et l'ouvrage ne constituent pas un ensemble mixte, mais deux ensembles dont il s'agit de connaître les interactions. Les mécaniciens des sols distinguent :
 - • les fondations superficielles (semelles ou radiers) ;
 - • les fondations profondes (pieux, puits, barrettes).

DOMAINES D'APPLICATION DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

- **Les sols**
- - **supportent des ouvrages: (*fondations superficielles, fondations semi-profondes, fondations profondes*)**



DOMAINES D'APPLICATION DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

○ Ouvrages mixtes

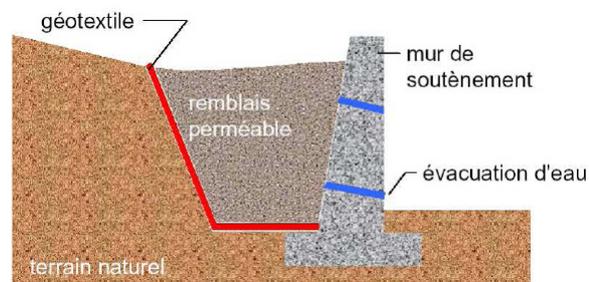
- Dans les ouvrages mixtes, le sol intervient en relation avec un autre matériau, le béton ou l'acier par exemple. Les conditions d'ancrage dans le sol sont souvent primordiales pour des ouvrages tels que :
 - les murs de soutènements (béton, terre armée, sol renforcé par géotextile...);
 - les palplanches utilisées dans les canaux, les ports, les constructions urbaines...;
 - les parois moulées (à fonction étanchéité ou à fonction soutènement)



DOMAINES D'APPLICATION DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

○ Les sols

- sont supportés par des ouvrages (*murs de soutènement, rideaux de palplanches*)



DOMAINES D'APPLICATION DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

- Les sols
- sont supportés par des ouvrages (*murs de soutènement, rideaux de palplanches*)



DOMAINES D'APPLICATION DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

- **Ouvrages en sol**
- Les ouvrages où le sol est le matériau de base sont aussi bien :
- les remblais (routes, voies ferrées, barrages, digues de bassins en terre, plates-formes maritimes...);
- ou des déblais (talus, canaux, bassins...).

DOMAINES D'APPLICATION DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

- Les sols sont des ouvrages: *remblais (routes, digues, barrage,...)*



DOMAINES D'APPLICATION DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

- Les sols sont des ouvrages: *remblais (routes, digues, barrage,...)*



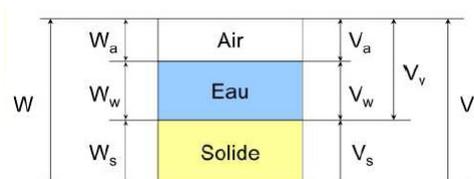
DOMAINES D'APPLICATION DE LA MÉCANIQUE DES SOLS

○ Milieux naturels

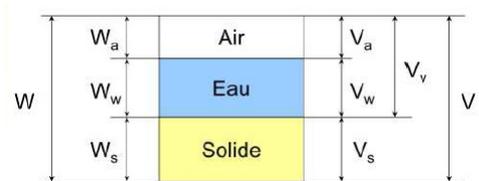
- Le domaine d'application de la mécanique des sols ne se limite pas aux constructions ; il comprend également des milieux naturels tels que les versants (problèmes de glissement de terrain) et les berges de cours d'eau ou de retenues.

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

- Description
- Existence de trois phases
- *définition de paramètres caractéristiques des sols*
- Représentation schématique
 - *volume élémentaire de sol*
 - *trois phases séparées*
 - *volumes et masses de chacune des phases*



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS



- W : poids total du sol
- W_s : poids des particules solides
- W_w : poids de l'eau
- $W = W_s + W_w$
- V : volume total (apparent)
- V_s : volume des particules solides
- V_v : volume des vides entre les particules
- V_w : volume de l'eau
- V_a : volume de l'air
- $V_v = V_w + V_a$
- $V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a$



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

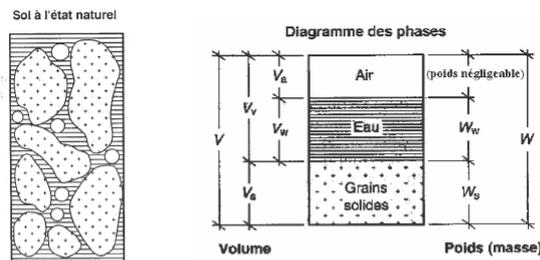


Fig 2.2 Schéma d'un volume élémentaire de sol : Poids et volumes des différentes phases

- Définitions et notations

- V : Volume total de l'échantillon de sol
- V_a : volume d'air contenu dans l'échantillon de sol
- V_w : volume d'eau contenu dans l'échantillon de sol ;
- V_s : Volume des grains solides contenus dans l'échantillon de sol
- W_a Poids de l'air contenu dans l'échantillon de sol ; il est en général négligeable ;



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Poids volumique

- Poids volumique apparent d'un sol (notation γ ; équivaut au poids total du sol)

C'est le poids de l'unité de volume de ce sol

(car $W_a \approx 0$)

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w + W_a}{V_s + V_w + V_a} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_w + V_a}$$

A noter :

Au laboratoire et par convention, W_s sera le poids du sol après un séjour de 24h dans une étuve à 105°

- poids volumique d'un sol sec (notation γ_d)

$$\gamma_d = \frac{W_s + W_a}{V_s + V_w + V_a} = \frac{W_s}{V}$$

- Poids volumique des grains solides (notation γ_s)

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

- Poids spécifique de l'eau contenu dans le sol (notation γ_w)

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

A noter : En pratique $\gamma_w = 10^3 \text{ g} = 9.81 \text{ KN} / \text{m}^3 \approx 10 \text{ KN/m}^3$

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Densité, porosité et indice de vide

- Densité humide $\frac{\gamma}{\gamma_w}$

- Densité sèche $\frac{\gamma_d}{\gamma_w}$

- Densité des grains (notation G): $G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$

- Porosité (n)

C'est le volume des vides contenus dans un échantillon donné ramené au volume total de l'échantillon

$$n = \frac{V_a + V_w}{V} = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{V_s}{V}$$

NB : $n \in [0; 1]$

On définit également la compacité $= \frac{V_s}{V} = 1 - n$

- Indice des vides (e)

C'est le volume des vides contenus dans un échantillon donné ramené au volume des grains solides de l'échantillon

$$e = \frac{V_a + V_w}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s}$$

NB : $e \in [0, 10; 5]$

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Teneur en eau - Degré de saturation

- Teneur en eau (notation ω) s'exprime en %
C'est le poids d'eau contenu dans le volume V rapporté à l'unité de poids des grains solides contenu dans V

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad \text{NB : } \omega \in [0 ; \omega_{\text{sat}}] \text{ (voir définition de } \omega_{\text{sat}} \text{ ci-après)}$$

- Degré de saturation (notation S_r)

C'est le volume occupé par l'eau ramené au volume total des vides

$$S_r = \frac{V_w}{V_w + V_a} \quad \text{NB : } S_r \in [0 ; 1]$$

Sol sec $S_r = 0$; saturé $S_r = 1$; un sol est dit saturé lorsque le vide est entièrement occupé par l'eau

- Teneur en eau de saturation (notation ω_{sat})

$$\text{C'est la teneur en eau de tel sorte que : } \omega = \omega_{\text{sat}} = e \frac{\gamma_w}{\gamma_s} = \frac{e}{G} = \gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$$



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Paramètre dimensionnels Poids volumiques

Poids volumique de l'eau

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

Poids volumique des grains solide

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

Poids volumique du sol sec

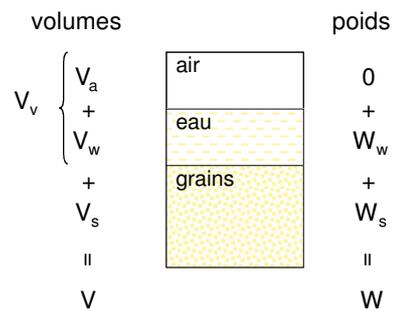
$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

Poids volumique humide

$$\gamma_h = \frac{W}{V}$$

Poids volumique saturé

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{W}{V} \quad \text{si matériau saturé}$$



50



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Paramètre dimensionnels

Poids volumiques

Poids volumique de l'air

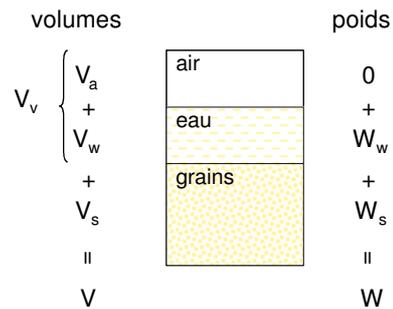
$$\gamma_a = \frac{W_a}{V_a} \cong 0$$

Poids volumique du sol saturé

$$\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V} = \frac{W_s + \gamma_w V_v}{V}$$

Poids volumique du sol déjaugé

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$



51



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

○ Ordre de grandeur

Ordre de grandeur

- $\gamma_s = 26$ à 27 kN/m^3 *sable et argile*

- $\gamma = \begin{cases} 17 \text{ à } 20 \text{ kN/m}^3 & \text{sable} \\ 16 \text{ à } 22 \text{ kN/m}^3 & \text{argile} \end{cases}$

- $\gamma_d = \begin{cases} 14 \text{ à } 18 \text{ kN/m}^3 & \text{sable} \\ 10 \text{ à } 20 \text{ kN/m}^3 & \text{argile} \end{cases}$

- $\gamma_{sat} = 19$ à 22 kN/m^3 *sable et argile*

- $\gamma' = 9$ à 12 kN/m^3 *sable et argile*



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Paramètres sans dimension

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad \text{2 pesées : avant et après étuve à } 105^\circ\text{C}$$

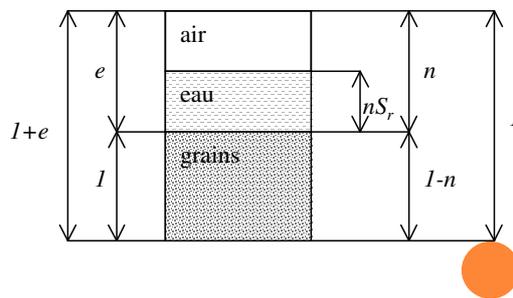
- poids total
- poids solide

Ordre de grandeur de w

- sable : 1 à 15 %
- argile : 10 à 20 %

Teneur en eau

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Paramètres sans dimension

Proportions volumiques entre les phases

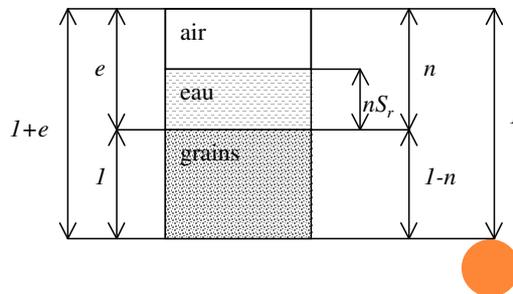
$$0 < n < 1$$

Ordre de grandeur de n

- sable : 0,25 à 0,50
- argile : 0,20 à 0,80

Porosité

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



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Paramètres sans dimension

Proportions volumiques entre les phases

Indice des vides

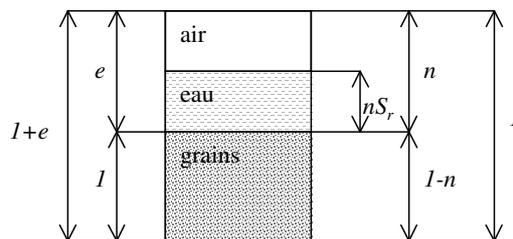
$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$0 < e \ll \infty$$

Ordre de grandeur de e

- sable : 0,5 à 1,00

- argile : 0,3 à 1,00



55

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

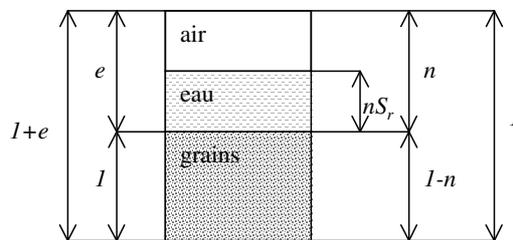
Paramètres sans dimension

Proportions volumiques entre les phases

Degré de saturation

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

- $S_r = 1$: sol saturé
- $S_r < 1$: sol non saturé
- $S_r = 0$: sol sec



56

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

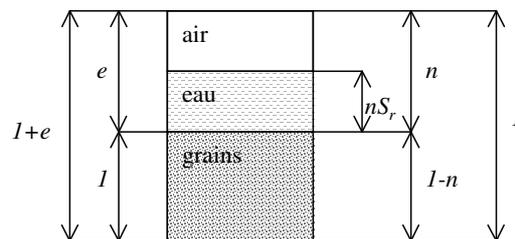
Paramètres sans dimension

Proportions volumiques entre les phases

Degré de saturation

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

- $S_r = 1$: sol saturé
- $S_r < 1$: sol non saturé
- $S_r = 0$: sol sec



57

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Quelques valeurs de ces paramètres

Sol	γ_s	e	w	γ_h
Sable de Fontainebleau : grenu	27,0 kN/m ³	0,86	10 %	16,0 kN/m ³
Argile verte du Sannoisien : fin	26,7 kN/m ³	0,77	30 %	19,6 kN/m ³
Limon d'Orly : fin	26,2 kN/m ³	0,69	16 %	18,0 kN/m ³
Tourbe de Bourgoin : organique	X	X	200 %	13,5 kN/m ³
Vase de Martrou : organique	18,0 kN/m ³	1,22	82 %	14,8 kN/m ³

58

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Relations entre paramètres

La connaissance de 3 paramètres :

γ : poids volumique (γ_{sat} ou γ_d)

e : indice des vides (ou n : porosité)

w : teneur en eau (ou S_r : degré de saturation)

permet la détermination de tous les autres.

59

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Relations entre 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] $w = e \cdot S_r \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$
[3] $n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$	[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] $w = S_r \cdot \gamma_w \cdot \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$
[13] $S_r = \frac{V_w}{V_v}$	[14] $S_r = \frac{\gamma_s \cdot w}{\gamma_w \cdot e}$	[15] $S_r = \frac{w}{w_{sat}}$ (γ_d constant)
[16] $\gamma = (1+w) \cdot \gamma_d$	[17] $\gamma = \gamma_d + n \cdot S_r \cdot \gamma_w$	[18] $\gamma = (1-n) \cdot \gamma_s + n \cdot S_r \cdot \gamma_w$
[19] $\gamma = \frac{1+w}{1+e} \cdot \gamma_s$	[20] $\gamma = \frac{\gamma_s + e \cdot S_r \cdot \gamma_w}{1+e}$	
[21] $\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$	[22] $\gamma_d = (1-n) \cdot \gamma_s$	[23] $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$
[24] $\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e}$	[25] $\gamma' = (\gamma_s - \gamma_w) \cdot (1-n)$	[26] $\gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \cdot \gamma_d$

60

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Relations entre paramètres

SOL NON SATURÉ				
fonction de : w	n	e	γ	γ_d
w = -	$\frac{Sn}{(1-n)G}$	$\frac{Se}{G}$	$\frac{\gamma_s - \gamma}{\frac{G}{S} \gamma - \gamma_s}$	$S \gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$
n = $\frac{wG}{wG + S}$	-	$\frac{e}{1+e}$	$\frac{\gamma - \gamma_s}{S \gamma_w - \gamma_s}$	$1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$
e = $\frac{wG}{S}$	$\frac{n}{1-n}$	-	$\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma - S \gamma_w}$	$\frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$
$\gamma = \frac{\gamma_s(1+w)}{\frac{wG}{S} + 1}$	$Sn \gamma_w + (1-n) \gamma_s$	$\frac{\gamma_s + Se \gamma_w}{1+e}$	-	$\gamma_d \left(1 - \frac{S}{G} \right) + S \gamma_w$
$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{\frac{wG}{S} + 1}$	$(1-n) \gamma_s$	$\frac{\gamma_s}{1+e}$	$\frac{\gamma - S \gamma_w}{1 - \frac{S}{G}}$	-
S =	$\frac{w}{\gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)} = \frac{w}{\frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{1}{G}} = \frac{\gamma - \gamma_d}{\gamma_w \left(1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \right)} = \frac{wG}{e}$			

61

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Relations entre paramètres

SOL SATURÉ				
fonction de : w	n	e	γ_{sat}	γ_d
w = -	$\frac{n}{(1-n)G}$	$\frac{e}{G}$	$\frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{G \gamma_{sat} - \gamma_s}$	$\gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$
n = $\frac{wG}{wG + 1}$	-	$\frac{e}{1+e}$	$\frac{\gamma_{sat} - \gamma_s}{\gamma_w - \gamma_s}$	$1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$
e = wG	$\frac{n}{1-n}$	-	$\frac{\gamma_s - \gamma_{sat}}{\gamma_{sat} - \gamma_w}$	$\frac{\gamma}{\gamma_d} - 1$
$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s(1+w)}{wG + 1}$	$n \gamma_w + (1-n) \gamma_s$	$\frac{\gamma_s + e \gamma_w}{1+e}$	-	$\gamma_d \left(1 - \frac{1}{G} \right) + \gamma_w$
$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{wG + 1}$	$(1-n) \gamma_s$	$\frac{\gamma_s}{1+e}$	$\frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{1 - \frac{1}{G}}$	-
autres relations				
$\gamma' = \gamma_d \left(1 - \frac{1}{G} \right) \approx 0,62 \gamma_d$				

62

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification d'un sol

Pour caractériser un sol, il faut déterminer les paramètres de nature et les paramètres d'état.



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification d'un sol

Les paramètres de nature indiquent les caractéristiques intrinsèques du sol. Ils ne varient pas au cours du temps:

- poids volumique des grains solides,
- granularité,
- argilosité,
- limites d'Atterberg,
- teneur en matières organiques,...etc



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification d'un sol

Les paramètres d'état sont fonction de l'état du sol et caractérisent le comportement du sol sous l'effet d'un chargement donné:

- teneur en eau,
- indice des vides,
- porosité,
- Equivalent de sable,...etc



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Determinations des caractéristiques du sol

- teneur en eau,

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad \begin{array}{l} 2 \text{ pesées : avant et après étuve à } 105^\circ\text{C} \\ \left| \begin{array}{l} - \text{ poids total} \\ - \text{ poids solide} \end{array} \right. \end{array}$$



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Determinations des caractéristiques du sol

➤ Poids volumique, $\gamma = \frac{W}{V}$

➤ 2 méthode pour déterminer le volume de l'échantillon



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Determinations des caractéristiques du sol

• Méthode par immersion dans l'eau :

(échantillon non remanié)

- pesée 1 (m) → poids d'échantillon
- échantillon recouvert d'une couche de paraffine ($\rho_{\text{paraffine}} = 0,88\text{g/cm}^3$)
- pesée 2 (m_p) → masse de la couche de paraffine (et son volume)
- pesée 3 (hydrostatique) (m'_p) → volume total (échantillon + paraffine)



$$V = V_{\text{sol+paraffine}} - V_{\text{paraffine}} = \frac{m_p - m'_p}{\rho_w} - \frac{m_p - m}{\rho_p}$$

• Méthode du moule :

(échantillon remanié)

- remplissage d'un moule jusqu'à débordement
- arasage à la règle → essai Proctor



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Determinations des caractéristiques du sol

➤ Poids volumique des particules solides $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$

Sa détermination se fait à l'aide d'un pycnomètre.

Une masse de sol sec m_s est introduite dans un pycnomètre contenant de l'eau distillée. Après avoir éliminé toutes les bulles d'air, on mesure le volume d'eau déplacé par les grains solides V_s .

N.B : Pour les sols (à part les sols organiques)
: 26 kN/m³ & gS & 28 kN/m³

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Determinations des caractéristiques du sol

➤ Poids volumique des particules solides $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \rightarrow \text{pesée}$$

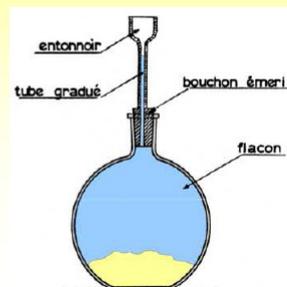
$$\rightarrow \text{à mesurer de façon précise}$$

(a) pycnomètre

(b) Pesée hydrostatique

Pycnomètre

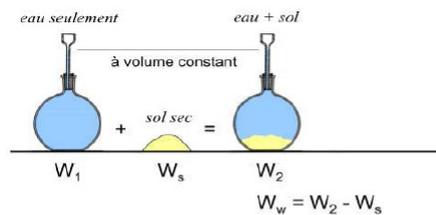
- sol séché puis pesé (W_s)
- sol dans le récipient contenant de l'eau distillée
- enlever les bulles d'air
- volume d'eau déplacé par le sol



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Determinations des caractéristiques du sol

➤ Poids volumique des particules solides $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$



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

$\frac{W_1}{\gamma_w}$

$\frac{W_w}{\gamma_w}$

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

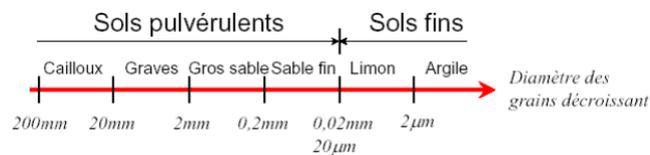


CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification du sol

➤ On distingue entre :

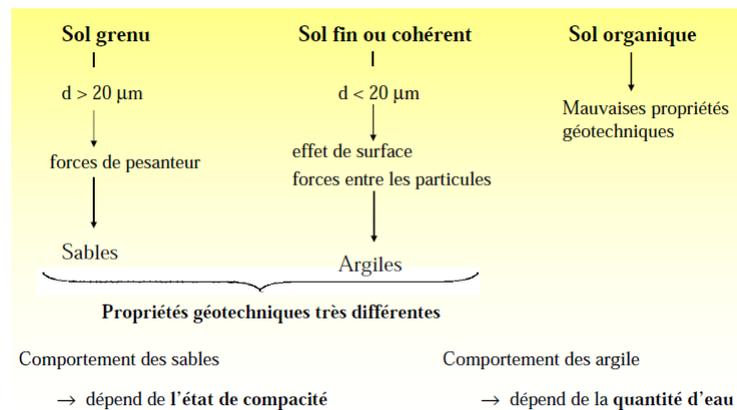
- les sol grenus (pulvérulents)
- Les sols fins



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification du sol

➤ Pourquoi faire la distinction?



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification du sol

➤ Pour sols grenus

Le Comportement des sols grenus dépend:

- du squelette solide, peu importe l'état d'humidité
- de l'importance de la dimension des grains et de leur état de compacité

➤ Les essais:

- Analyse granulométrique par tamisage
- Essai d'équivalent de sable
- Indice de densité

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification du sol

➤ Pour sols fins:

Le comportement des sols fins dépend de:

- La taille des grains → forces de cohésion
- La présence d'eau → changement de consistance

- Les essais pour les sols fins:

- **Analyse granulométrique par sédimentométrie**
- **Limites d'Atterberg**
- **Limite de liquidité W_L**
- **Limite de plasticité W_p**
- **Indice de plasticité I_p**
- **Indice de consistance I_c**
- **Activité**
- **Valeur de bleu de méthylène**



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification les essais granulométriques

Granulométrie

Tamissage particules de dimensions > 0,1 mm

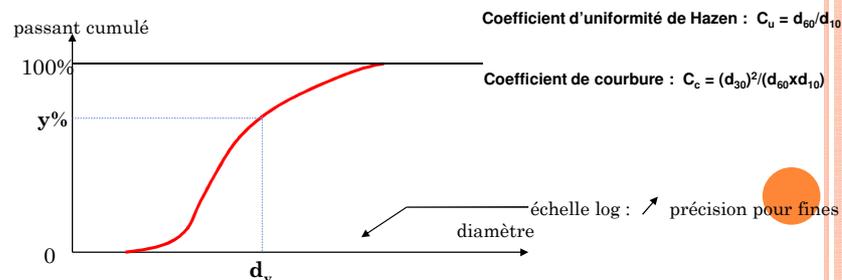
76

Par définition, le diamètre d'une particule est égal à l'ouverture intérieure des mailles du plus petit tamis la laissant passer.

Tamissage à sec : matériaux sans cohésion (sables, graviers)

Tamissage sous l'eau : matériaux plus fins (limons, argiles)

Courbe granulométrique



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification les essais granulométriques

Granulométrie

• Granulométrie → *distribution massique des grains suivant leur dimension*

• passage d'une quantité de sol au travers d'une série de tamis d'ouverture progressivement plus petite

• Sol pulvérulent : tamisage

- jusqu'à 40 ou 80 μm

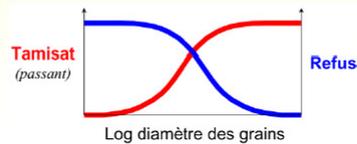
- utilisation de passoirs et de tamis

trous circulaires ←

mailles carrées ←

- à sec pour les gros grains

- sous eau pour les matériaux cohérents



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification les essais granulométriques

Granulométrie

Courbe granulométrique → représentation graphique donnant :

- la masse de tamisat cumulé (en %)

- le diamètre des particules

échelle arithmétique

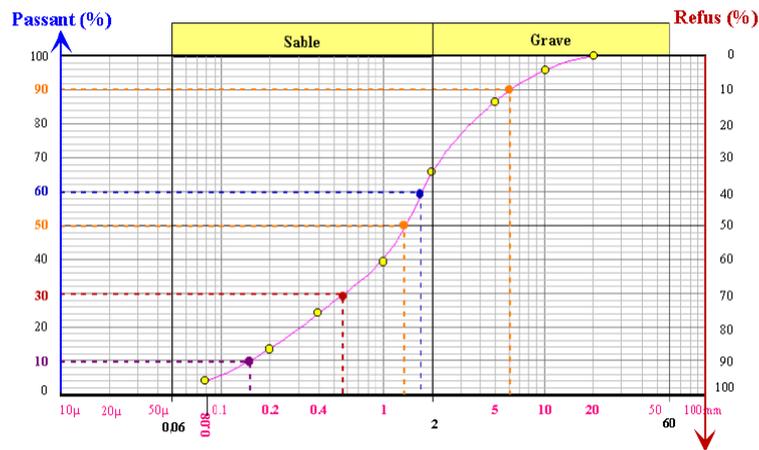
échelle logarithmique



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification les essais granulométriques

Granulométrie



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification les essais granulométriques

Granulométrie

- Caractéristiques de la courbe granulométrique → utilisation de coefficients

- Coefficient d'uniformité :

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

$C_u > 2$ → granulométrie étalée

$C_u < 2$ → granulométrie uniforme ou serrée

Diamètre effectif D_{10} = diamètre correspondant à 10 % de passage à travers le tamis

- Coefficient de courbure :

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$$

sol bien calibré : $1 < C_c < 3$

- $d_{10} = 0.17$

- $d_{30} = 0.58$

- $d_{60} = 1.80$

le sol bien calibré est un sol dont les particules varient beaucoup en diamètre sans avoir de grosseur prédominante
 Un *sol bien calibré* nécessite une énergie de compactage moindre qu'un sol mal calibré

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification les essais granulométriques

Etat de densité dans lequel se trouve un sol pulvérulent

Indice de densité relative I_D : Mesure relative de l'indice des vides naturel e d'un sol par rapport aux valeurs e_{min} (indice des vides dans l'état la plus compacté) et e_{max} (indice de vide dans l'état la moins compacté) de ce même sol que l'on pourrait obtenir en laboratoire

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

Sol lâche	$e \approx e_{max}$	\rightarrow	$I_D \approx 0$
Sol serré	$e \approx e_{min}$	\rightarrow	$I_D \approx 1$

Pratiquement on qualifiera un sol de:

- Lache si sa densité relative $< 50\%$
- Dense si sa densité relative $> 50\%$

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification

Granulométrie

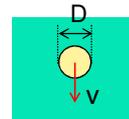
Sédimentométrie

Particules < 0,1 mm - Sédimentation des particules dans un liquide de poids volumique γ_l

Méthode basée sur la loi de Stokes qui exprime la vitesse de décantation d'une particule sphérique dans un liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule :

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_l}{18\mu} D^2$$

μ : viscosité dynamique du liquide
 v : vitesse de chute de la particule
 γ_s : poids volumique solide



En pratique, il faut opérer sur une suspension de faible concentration (≈ 20 g/l) initialement homogène.

La méthode consiste à mesurer la variation de la densité de la suspension à différentes hauteurs en fonction du temps.

On obtient ainsi la répartition en dimension des particules du sol testé.

83

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification

Granulométrie

Sédimentométrie

A la profondeur H, à l'instant t, on ne trouve plus que des particules dont le diamètre < D_y :

$$D_y = \sqrt{\frac{18\mu}{\gamma_s - \gamma_l} \frac{H}{t}}$$

Un volume unité de solution à la profondeur H contient en masse :

$$y \frac{M_s}{V} \times 1 + \frac{\gamma_l}{g} \left(1 - y \frac{M_s}{V} \frac{g}{\gamma_s} \times 1 \right)$$

M_s : masse solide en solution
 V : volume de solution
 y : proportion en masse de sol sec de particules < D_y

masse des particules solides
masse du liquide

84

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

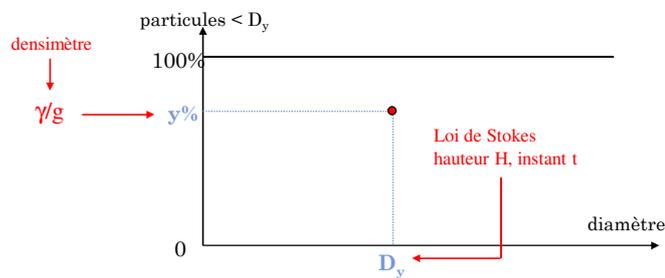
Identification

Granulométrie

Sédimentométrie

On mesure la masse volumique γ/g de la suspension, on obtient :

$$y = \frac{V}{M_s g} (\gamma - \gamma_l) \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_l}$$



85

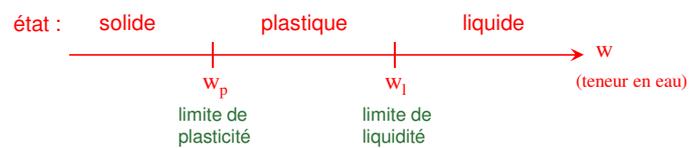
CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification

Essais propres aux sols fins

Limites d'Atterberg

La consistance d'une argile dépend en grande partie de sa teneur en eau



- ▶ Détermination de W_l
 - Essai à la coupelle de Casagrande
 - Essai de pénétrabilité : fall cone
- ▶ Détermination de W_p
 - Façonnage de rouleaux de 3 mm de diamètre par amincissement

86

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification

Essais propres aux sols fins

Limites d'Atterberg

87

Etat liquide :

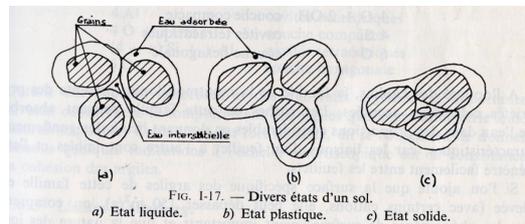
Les grains sont indépendants les uns des autres, leurs mouvements relatifs sont aisés.

Etat plastique :

Les grains ont mis en commun leurs couches adsorbées si bien qu'ils sont liés par des chaînes de molécules d'eau qui s'accrochent à leurs 2 extrémités sur chaque grain, les mouvements se font ensemble.

Etat solide :

Les grains sont en contact en quelques points en ayant chassé l'eau adsorbée, les mouvements relatifs génèrent des frottements



CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Identification

Essais propres aux sols fins

Limites d'Atterberg

88

Indice de plasticité

$$I_p = w_l - w_p$$

Indice de consistance

$$I_c = \frac{w_l - w}{w_l - w_p} = \frac{w_l - w}{I_p}$$

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Classification

Sols fins

Diagramme de Casagrande

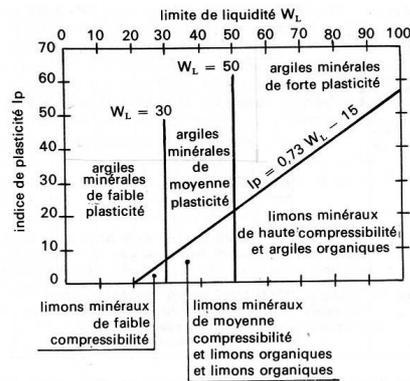


FIG. 1-23. — Abaque de plasticité de Casagrande.

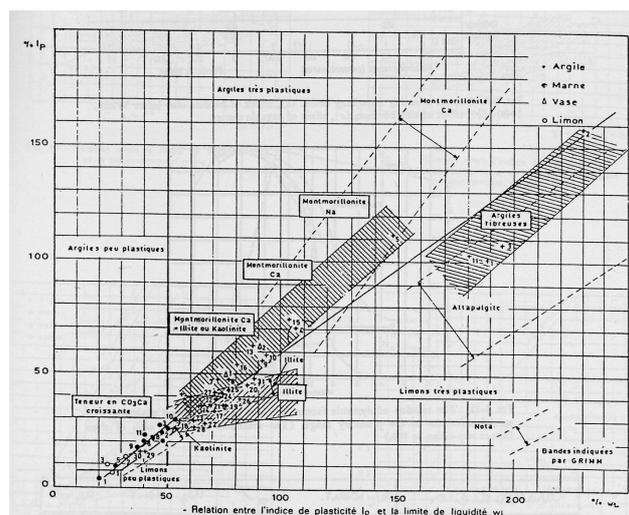
68

CARACTÉRISTIQUE PHYSIQUE DES SOLS

Classification

Sols fins

Diagramme de Casagrande



06

CLASSIFICATION DES SOLS GRENUS (plus de 50 % des éléments > 0,08 mm)					
Définitions		Symboles	Conditions	Appellations	
GRAVES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre de > 2 mm	Moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Gb	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		Plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	GL	Limite d'Atterberg au-dessous de A	grave limoneuse
			GA	Limite d'Atterberg au-dessus de A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre de < 2 mm	Moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Sb	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		Plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	SL	Limite d'Atterberg au-dessous de A	sable limoneux
			SA	Limite d'Atterberg au-dessus de A	sable argileux
Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % → on utilise un double symbole					