



المدرسة العليا للتكنولوجيا - العيون  
+ΣΙCΠ +οοЖИИο+ I +ΣKISNΣ+ - И.А.С.И  
ÉCOLE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE - LAÂYOUNE

*Ecole Supérieure de Technologie, LAAYOUNE*

Intitulé du module:  
**Géotechnique**

*Filière: Génie civil*

**Pr. Laila KHATRA**

*2019/2020*

# CONTENU DU MODULE

- **Chapitre 1: Caractéristiques physique, structure et classification du sol**
  - Généralités et définitions
  - Processus géologique de formation des sols
  - Différentes phases constitutives d'un sol
  - Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure
- **Chapitre 2: Essais d'identification – sols fins et sols grenus**
  - Essai d'équivalent de sable/Indice de vide
  - Les limites d'ATTERBURG:
    - Limite de liquidité
    - Limite de plasticité
    - Limite de retrait
    - Indice de plasticité
- **Chapitre 3: Classification des sols**





# Ch1

## **CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES & STRUCTURE & CLASSIFICATION DES SOLS**

## Définitions

## Domaine d'application

## Intérêt de la géotechnique

### Généralités & définitions

Processus géologique de formation des sols

Différentes phases constitutives d'un sol

Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

**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.



**Définitions**

**Domaine  
d'application**

**Intérêt de la  
géotechnique**

**Généralités  
&  
définitions**

**Processus  
géologique de  
formation des  
sols**

**Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol**

**Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure**

## **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).

Définitions

Domaine  
d'application

Intérêt de la  
géotechnique

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

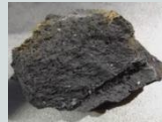
Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

## 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.



Définitions

Domaine  
d'application

Intérêt de la  
géotechnique

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

## 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).



## Définitions

## Domaine d'application

## Intérêt de la géotechnique

### Généralités & définitions

Processus géologique de formation des sols

Différentes phases constitutives d'un sol

Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

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.

## Définitions

## Domaine d'application

## Intérêt de la géotechnique

## Généralités & définitions

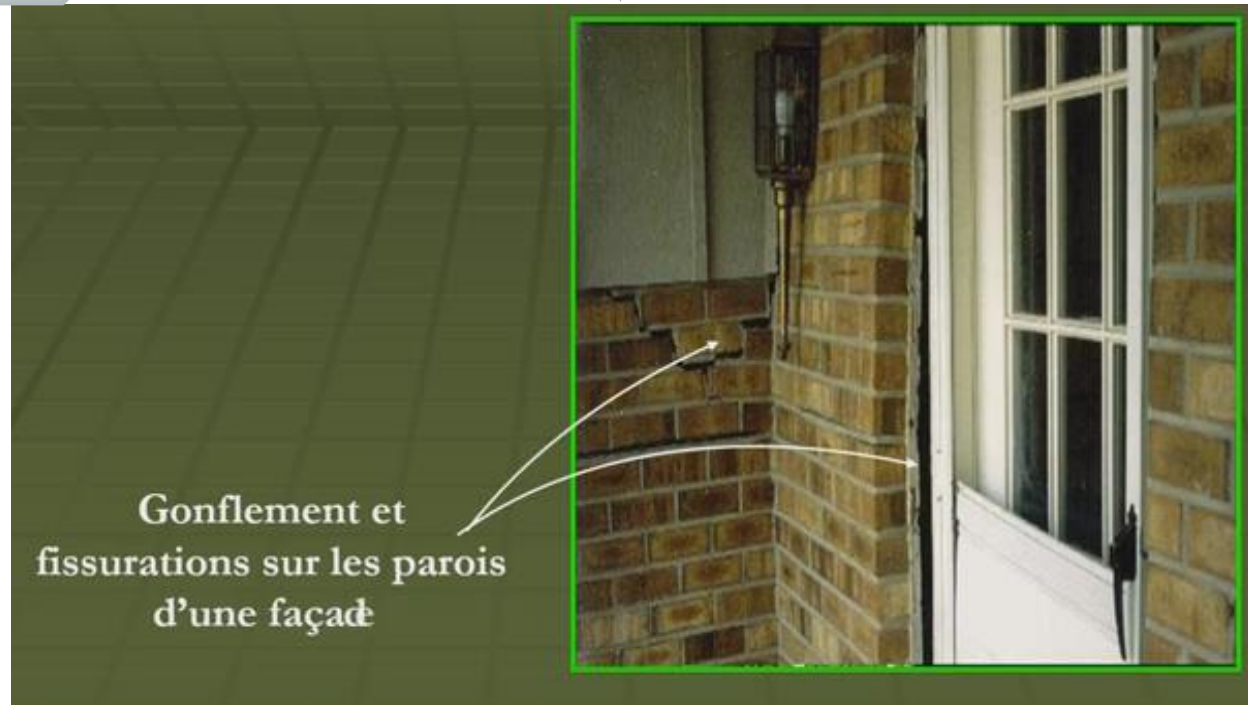
Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

Exemples d'accidents et catastrophes rencontrés dans le génie civil montrant l'importance de réaliser une étude géotechnique avant d'entamer la phase de construction.

Ex1





Définitions

Domaine  
d'application

Intérêt de la  
géotechnique

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

Ex2

Fissurations excessives  
sur les parois d'une cage  
d'escaliers



Définitions

Domaine  
d'application

Intérêt de la  
géotechnique

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

Ex3



Importante humidification des murs d'une construction réalisée sur  
un mur enterré causée par absence d'un système de drainage



Définitions

Domaine  
d'application

Intérêt de la  
géotechnique

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

Ex5



Instabilités de sols causant des dégâts vis – à vis  
des constructions bâties à proximité



Définitions

Domaine  
d'application

Intérêt de la  
géotechnique

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

Ex6

Accidents affectant des digues de barrage en terre provoquant la ruine totale de ces ouvrages.



Avant la ruine



Après la ruine



Avant la ruine



Après la ruine



## Définitions

## Domaine d'application

## Intérêt de la géotechnique

### Généralités & définitions

Processus géologique de formation des sols

Différentes phases constitutives d'un sol

Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

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.



## Formation du sol

## Etapes de formation de sol

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

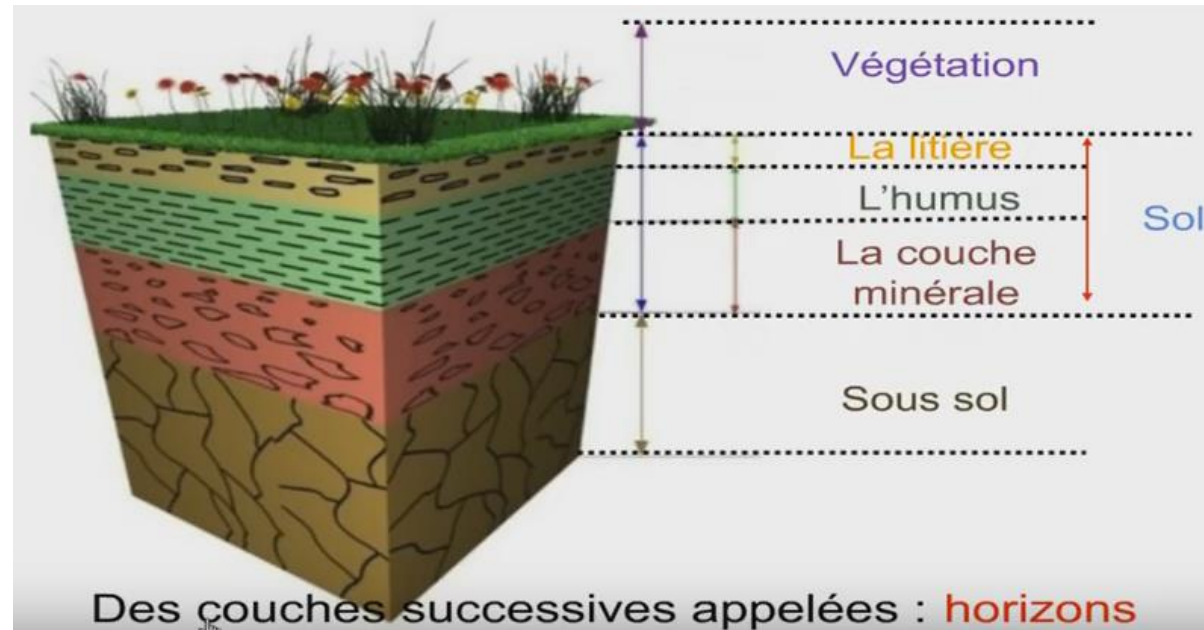


Schéma d'une coupe de sol

Les différentes couches qui constituent le sol:

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

## Formation du sol

## Etapes de formation de sol

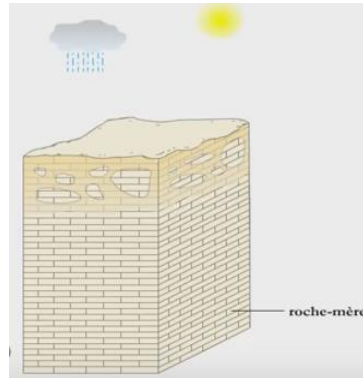
### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

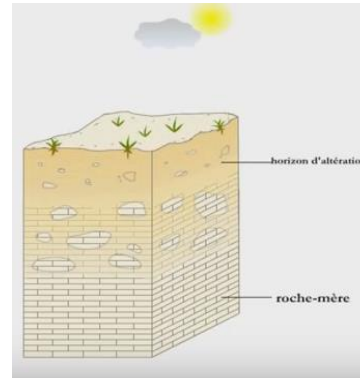
Etape 1 → Etape 2 → Etape 3 → Etape 4



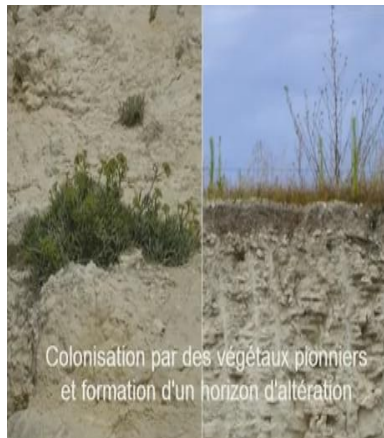
Désagrégation et altération chimique de la roche mère



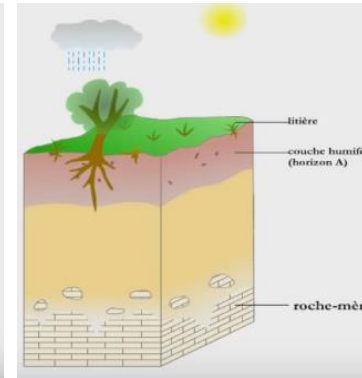
Désagrégation et altération chimique de la roche mère



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



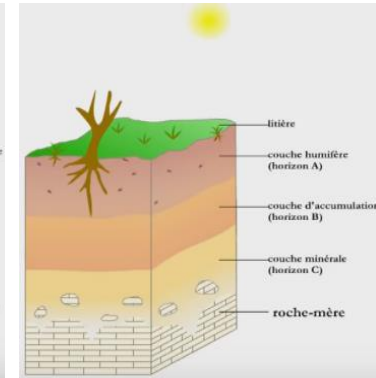
Colonisation par des végétaux pionniers et formation d'un horizon d'altération



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



Formation de l'humus (enrichissement en matières organiques)



Formation de nouveaux horizons par migration et accumulation de matières



Formation de nouveaux horizons par migration et accumulation



## Eléments constitutifs d'un sol

## Phases constitutives d'un sol

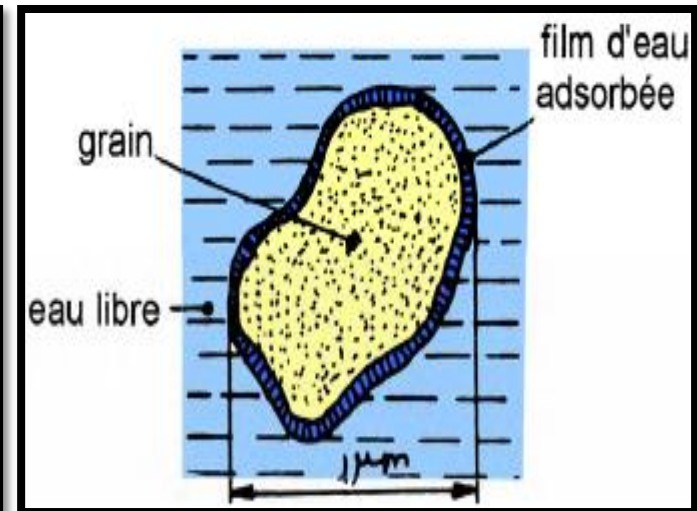
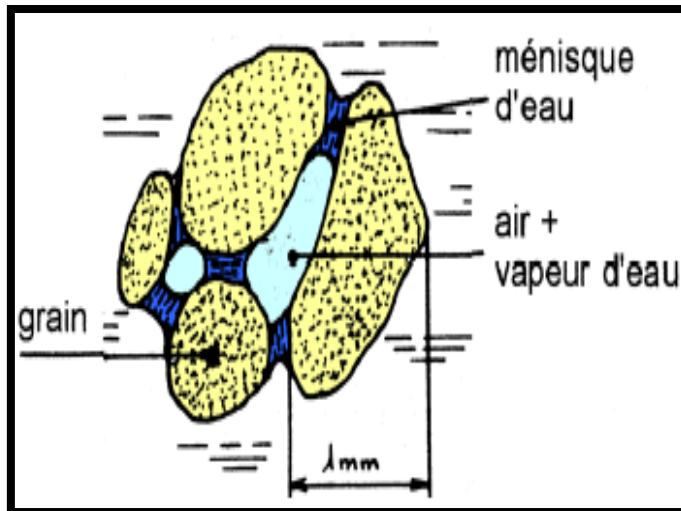
### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

- 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

## Eléments constitutifs d'un sol

## Phases constitutives d'un sol

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

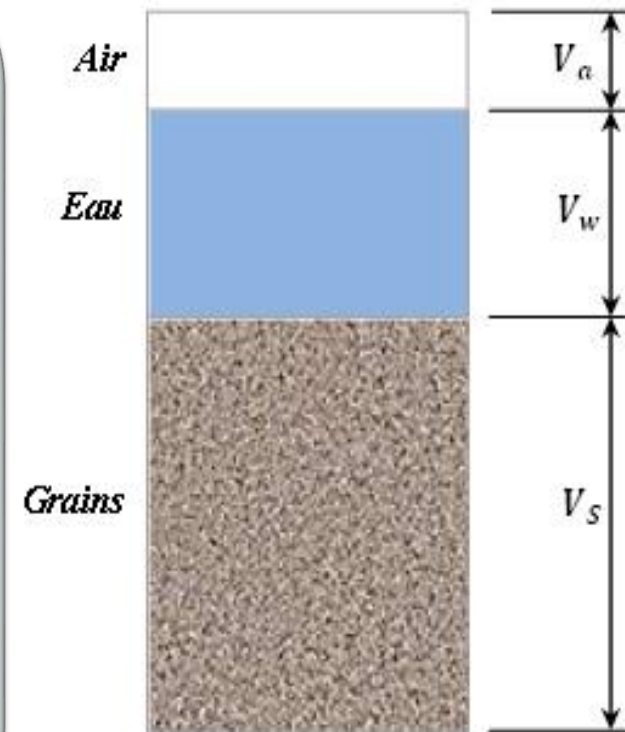
### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

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

## Description

## Paramètres d'état des sols

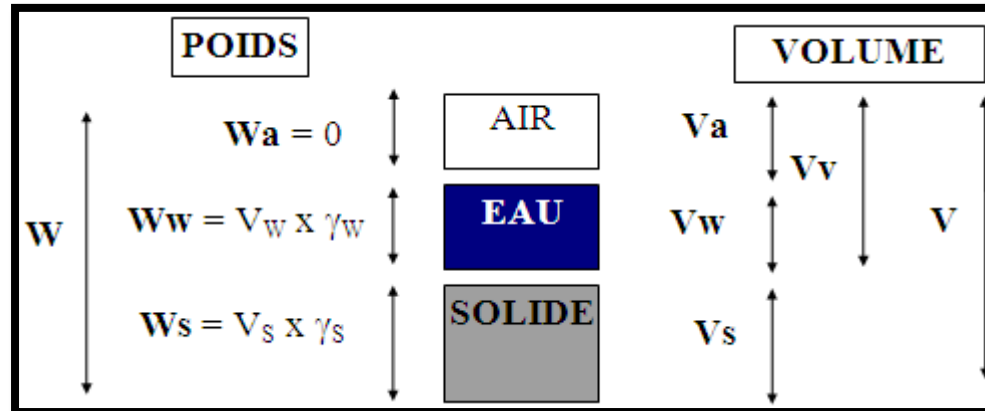
## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure



Représentation schématique des trois phases d'un sol

### Les paramètres définissant l'état d'un sol

<b>W :</b> Poids de l'échantillon	<b>V :</b> Volume de l'échantillon
<b>W<sub>w</sub> :</b> Poids de l'eau libre	<b>V<sub>a</sub> :</b> Volume de l'air
<b>W<sub>s</sub> :</b> Poids des grains solides	<b>V<sub>w</sub> :</b> Volume de l'eau
<b>V<sub>v</sub> :</b> Volume du vide entre les grains solides	<b>V<sub>s</sub> :</b> Volume du solide

Où

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

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



Description

Paramètres d'état  
des sols

Paramètres caractéristiques  
des sols (dimensionnelles)

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

-Les **paramètres d'état**: exprimant la proportion relative de chaque phase constitutive d'un sol.

Paramètres d'état

DIMENSIONNELS

Poids volumiques

ADIMENSIONNELS

caractérisation de l'état du  
sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

#### Les paramètres DIMENSIONNELS (ou POIDS VOLUMIQUES (kN/m³)):

En se reportant à la représentation conventionnelle classique d'un volume  $V$  de sol dans lequel les trois phases seraient séparées, on définit successivement les différents poids volumiques:

#### • Le poids volumique total du sol: $\gamma$

Poids de sol (3 phases) par unité de volume du sol (ou poids volumique humide,  $\gamma_h$ ).

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

#### • Le poids volumique du sol sec (ou densité sèche): $\gamma_d$

Poids des grains du sol par unité de volume du sol.

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

#### • Le poids volumique des grains solides: $\gamma_s$

Poids des grains du sol par unité de volume des grains du sol.

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

## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

• Le poids volumique de l'eau:  $\gamma_w$

Poids d'eau par unité de volume.

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

• Le poids volumique 'déjaugé':  $\gamma'$

Poids volumique du sol diminué du poids volumique de l'eau.

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

Ce poids volumique intervient lorsque le sol est saturé (  $\gamma = \gamma_{sat}$  ) et subit la poussée d'Archimède.

## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

#### •Ordre de grandeur de ces paramètres:

L'unité du poids volumique est:  $\text{N/m}^3$  ou mieux  $\text{kN/m}^3$ .

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . On prend souvent  $g \approx 10 \text{ m/s}^2$  d'où:

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

$\gamma =$	15 à 18 $\text{kN/m}^3$	pour les Argiles
$\gamma =$	18 à 21 $\text{kN/m}^3$	pour les sables
$\gamma =$	21 à 23 $\text{kN/m}^3$	pour les graves
$\gamma_s =$	27 $\text{kN/m}^3$	sans autre précision

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure



## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

#### Les paramètres ADIMENSIONNELS :

Ils indiquent dans quelle proportion les différentes phases sont présentes dans le sol.

#### • La teneur en eau ( $\omega$ ):

Poids d'eau rapporté au poids de sol sec (exprimé en pourcentage).

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

#### • Le degré de saturation ( $S_r$ ):

Rapport de la teneur en eau du sol à sa teneur en eau de saturation dans le même état.

$$S_r = \frac{V_W}{V_V} \times 100 \text{ ou } \frac{\omega}{\omega_{SAT}} \times 100$$

#### • L'indice des vides ( $e$ ):

Volume des vides (phases liquide et gazeuse) par unité de volume des grains du sol.

$$e = \frac{V_V}{V_S}$$

#### • Degré de porosité ( $n$ ):

Volume des vides (phases liquide et gazeuse) par unité de volume du sol.

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



## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

Pour les besoins de la mécanique des sols on admettra les valeurs suivantes:

$$\gamma_w = 10. \text{ kN} / \text{ m}^3$$

$$\gamma_s = 27. \text{ kN} / \text{ m}^3$$

-Pour les sables et argiles:  $\gamma_s \approx 26 \text{ à } 27 \text{ kN/m}^3$

-Hormis les sols d'origine végétale,  $\gamma_s$  varie peu avec la nature minéralogique ou chimique des grains du sol.

-On s'intéresse essentiellement dans la suite soit aux:

-Sols grenus non saturés;

-Sols fins ( $S_r = 1$ );

-Sols voisins de la saturation ( $S_r \approx 1$ ).

(Ces situations existent fréquemment dans la nature).

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

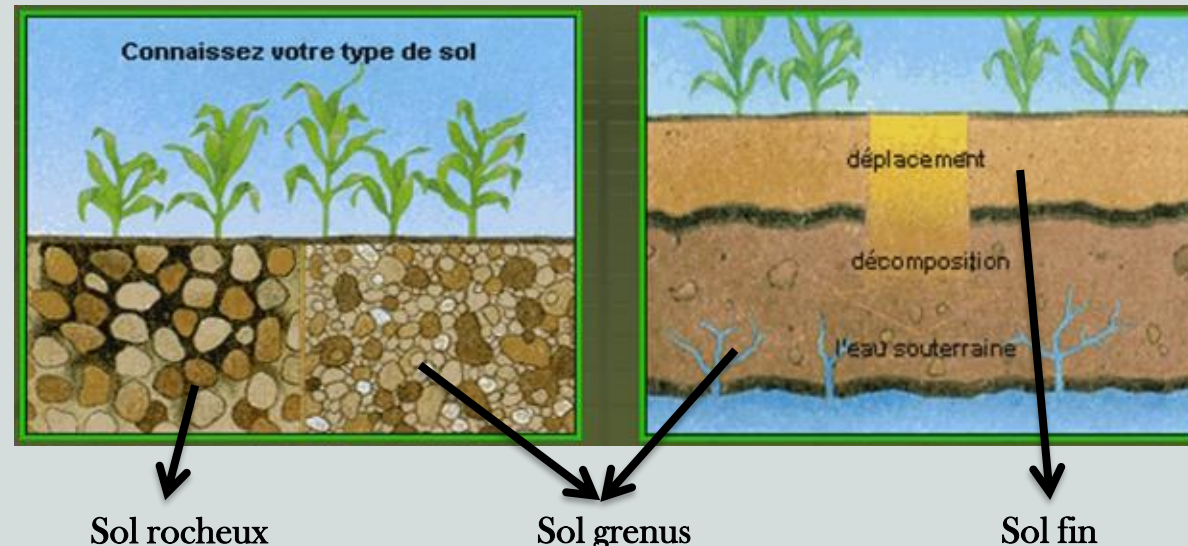
### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

-L'indice des vides ( $e$ ) et la teneur en eau ( $\omega$ ) 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.



## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

- L'état d'un sol peut être défini par:
- 3 paramètres:  $(e, \gamma_s, \omega)$  pour un sol non saturé.
- 2 paramètres:  $(e, \gamma_s)$  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:

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

$e_{\min}$  et  $e_{\max}$  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:  $0.40 \leq e \leq 1$



## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

#### Relation entre les paramètres:

Les paramètres définissant l'état d'un sol, que l'on vient de définir, ne sont pas indépendantes. Il est courant que l'on ait besoin de calculer certains d'entre eux à partir de la mesure des autres.

Les relations les plus importantes sont les suivantes:

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (1)$$

$$\omega = e \cdot S_r \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \quad (2)$$

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (3)$$

Pour les sols saturés  $e = \omega \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$  (4)

$$\gamma_h = \frac{1+\omega}{1+e} \cdot \gamma_s = (1-n) \cdot \gamma_s + n \cdot S_r \cdot \gamma_w = (1+\omega) \gamma_d \quad (5)$$

$$\gamma_d = (1-n) \cdot \gamma_s = (1-n) \cdot \gamma_s = \frac{\gamma_s}{1 + \omega_{sat} \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_w}} \quad (6)$$

Pour les sols saturés  $\gamma_{sat} = \gamma_d + n \cdot \gamma_w = \gamma_d + (1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}) \cdot \gamma_w$  (7)

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = (1-n)(\gamma_s - \gamma_w) = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} \quad (8)$$

## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

**Généralités  
&  
définitions**

**Processus  
géologique de  
formation des  
sols**

**Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol**

**Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure**

### Quelques exemples de paramètre de sols:

Le tableau suivant donne les caractéristiques de différents sols en place:

Sol	Période ou étage géologique	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	Indice des vides $e$	Porosité $n$	Teneur en eau $w$	$\gamma_h$ (KN/m <sup>3</sup> )	Teneur en matière organique	Teneur en CaCO <sub>3</sub>
Sable de fontainebleau	Stampien	27.0	0.75	0.43	6%	16.3	===	===
limon d'Orly	quaternaire	26.2	0.6	0.38	23%	19.3	===	===
Limon de la perche	Crétacé supérieur	26.7	1.4	0.58	50%	===	===	===
Argile verte de Romainville	Saannoisien (oligocène)	26.7	0.80	0.44	30%	19.7	===	0.2
Argile des Flandres	Ypresien (éocène)	27.4	1.01	0.50	35%	18.5	===	0.2
Argile de Dozulé	Callovo-oxfordien	26.6	0.50	0.33	19%	21.2	===	===
Vase de pallavas	quaternaire	26.3	1.73	0.63	66%	16.2	5%	===
Tourbe de Bourgoin	quaternaire	===	9	0.90	580%	===	55%	===
Argile de mexico	Origine volcanique	===	3.38 à 13.50	0.77 à 0.93	===	===	===	===

## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

### Exercice d'application 1:

Vérifier les relations entre les paramètres d'état des sols suivantes:

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (1)$$

$$\omega = e \cdot S_r \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \quad (2)$$

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (3)$$

Pour les sols saturés  $e = \omega \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$  (4)

$$\gamma_k = \frac{1+\omega}{1+e} \cdot \gamma_s = (1-n) \cdot \gamma_s + n \cdot S_r \cdot \gamma_w = (1+\omega) \gamma_d \quad (5)$$

$$\gamma_d = (1-n) \cdot \gamma_s = (1-n) \cdot \gamma_s = \frac{\gamma_s}{1 + \omega_{sat} \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_w}} \quad (6)$$

Pour les sols saturés  $\gamma_{sat} = \gamma_d + n \cdot \gamma_w = \lambda_d + (1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}) \cdot \gamma_w$  (7)

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w = (1-n)(\gamma_s - \gamma_w) = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} \quad (8)$$



## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

#### • Mesures de laboratoires:

-D'après ce que l'on vient de voir, il suffit de **déterminer** les valeurs des **trois paramètres indépendants**  $\gamma_s$ ,  $\omega$  et  $e$  (paramètres nécessaires à la classification du sol) où l'on tire ensuite les autres caractéristiques à l'aide des relations précédentes.

-Compte tenu de la disposition inévitable, due notamment à l'hétérogénéité du matériau, on **prendra la moyenne de plusieurs essais** (dispersion des mesures). Les mesures se font en général au laboratoire.

☐ Détermination du poids volumique des grains solides  $\gamma_s$

☐ Détermination de la teneur en eau  $\omega$

☐ Détermination de l'indice des vides  $e$

## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

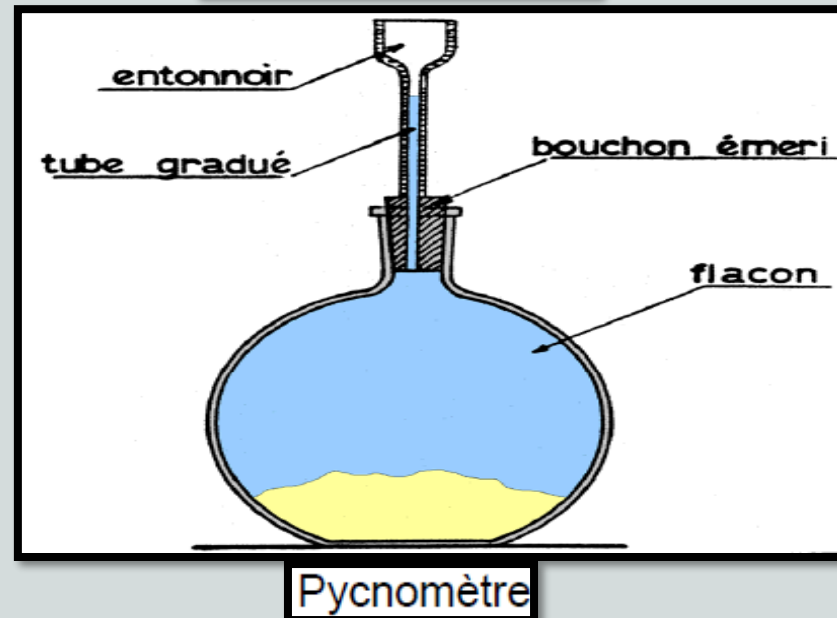
### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

#### □ Détermination du poids volumique des grains solides $\gamma_s$

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:

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



Description

Paramètres d'état  
des sols

Paramètres caractéristiques  
des sols (dimensionnelles)

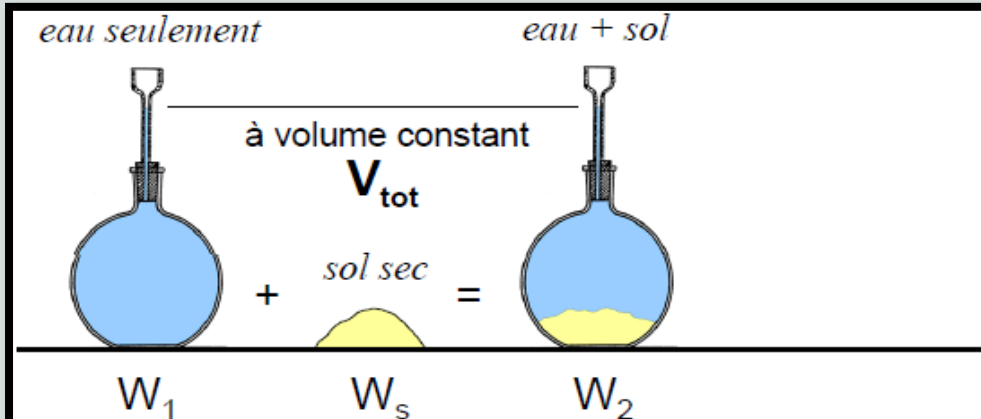
Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

□ Détermination du poids volumique des grains solides  $\gamma_s$



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

$$\downarrow \quad \quad \downarrow$$

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

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



## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

#### ☐ Détermination de la teneur en eau $\omega$

Elle se fait par **deux pesées**:

-1. L'une à la **teneur en eau naturelle** qui donne le poids **W** de l'échantillon **humide**.

-2. 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<sub>s</sub>** de l'échantillon).

On en tire :

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

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

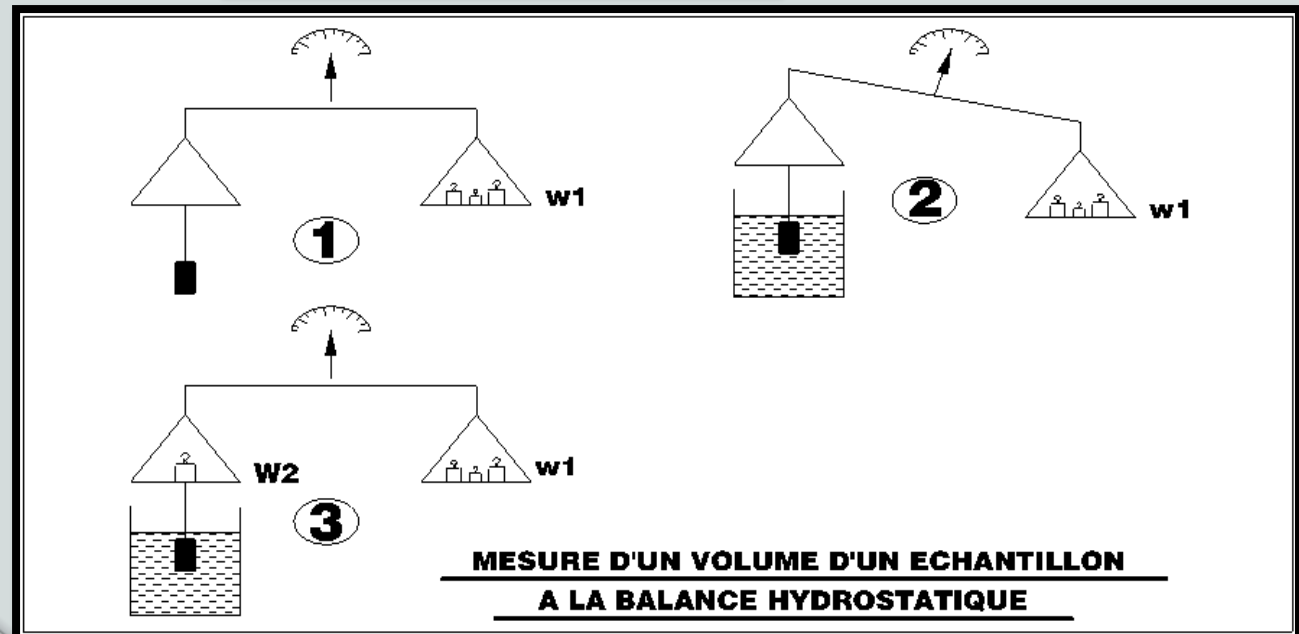
### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

#### □ 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: 
$$e = [V / (W_s / \gamma_s)] - 1$$



## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

### Exercice d'application 2:

*Un échantillon d'argile saturée a une masse de 1 526 g ; après passage à l'étuve, sa masse n'est plus que de 1 053 g. Le constituant solide des grains a une densité de 2,7. On demande :*

- la teneur en eau  $w$
- l'indice des vides  $e$
- la porosité  $n$
- le poids volumique humide  $\gamma_h$
- la densité humide  $(\gamma_h / \gamma_w)$ .

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



## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

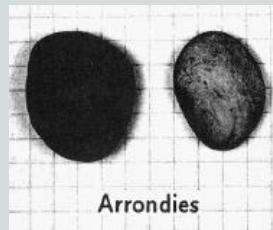
### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

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):



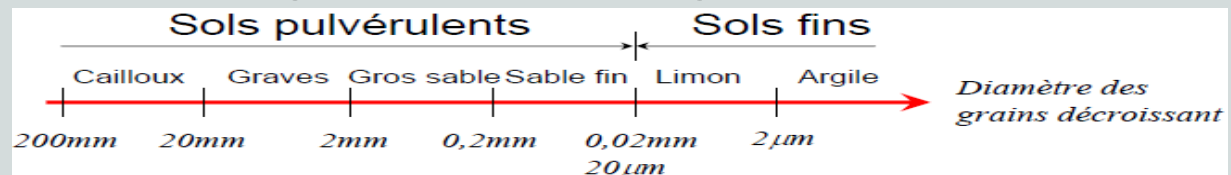
- Les particules en plaquettes: cas des sols fins (argiles):



#### • Dimensions des grains solides:

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

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



## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

#### • 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 **passent** 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.

Description

Paramètres d'état  
des sols

Paramètres caractéristiques  
des sols (dimensionnelles)

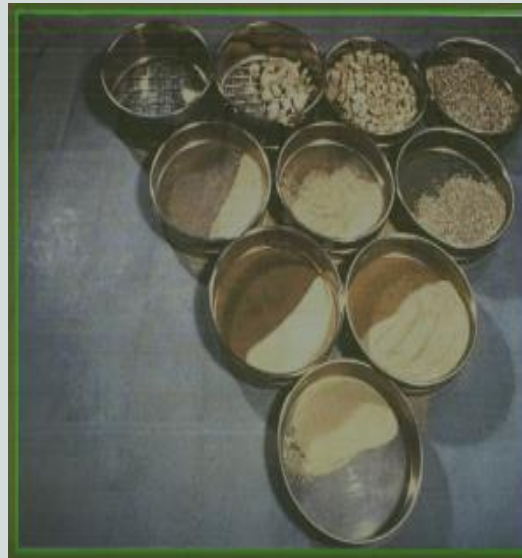
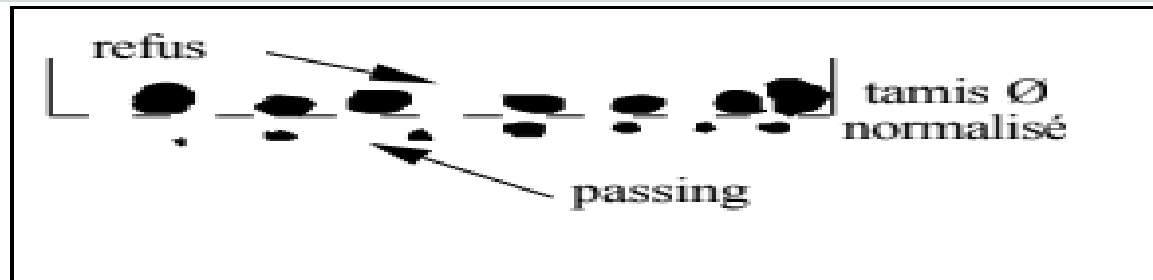
Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

- Essais de tamisage (cas des sols grenus):



Distribution des grains obtenus  
après l'essai de tamisage



Colonne de tamis d'ouvertures différentes





## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

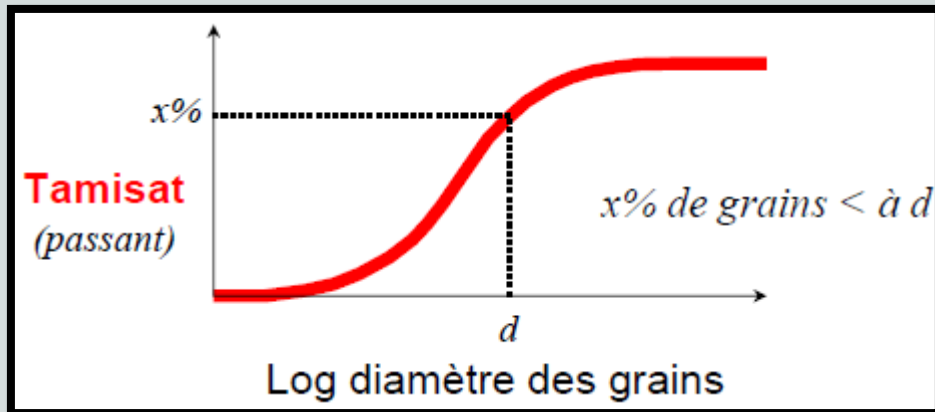
### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

#### → La courbe granulométrique:

La courbe représente le **pooids** 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 :

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

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:**  $D_{60} = 4$  signifie qu'au tamis de 4 mm, le tamisât cumulé vaut 60%.

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

#### 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 23 (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.

## Description

## Paramètres d'état des sols

## Paramètres caractéristiques des sols (dimensionnelles)

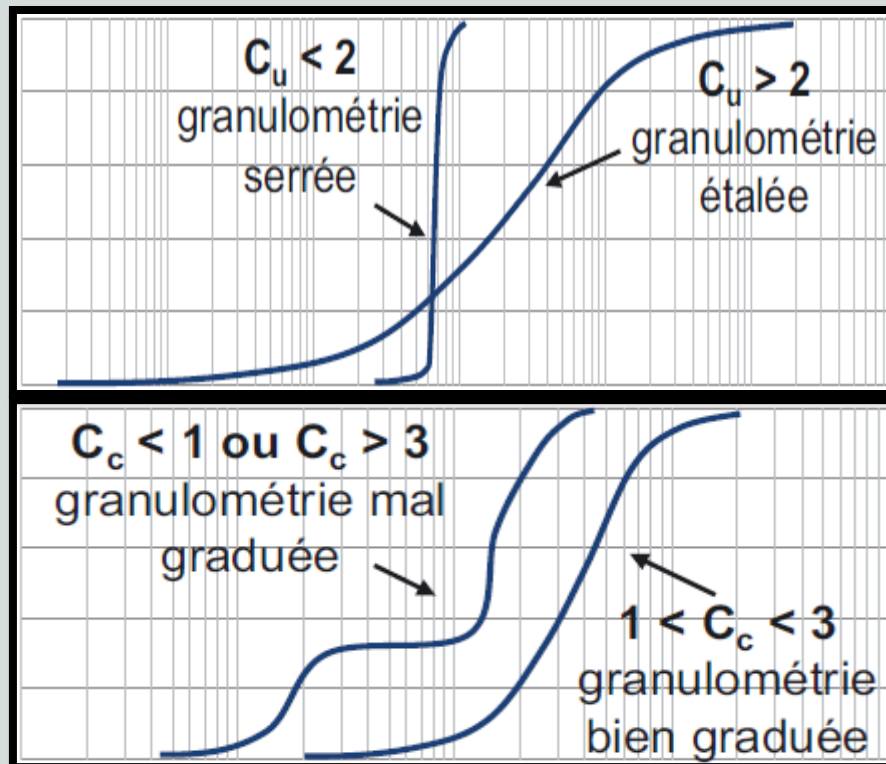
### Généralités & définitions

### Processus géologique de formation des sols

### Différentes phases constitutives d'un sol

### Caractéristiques physiques et dimensionnelles des sols et leur mesure

- 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  $C_c$



Description

Paramètres d'état  
des sols

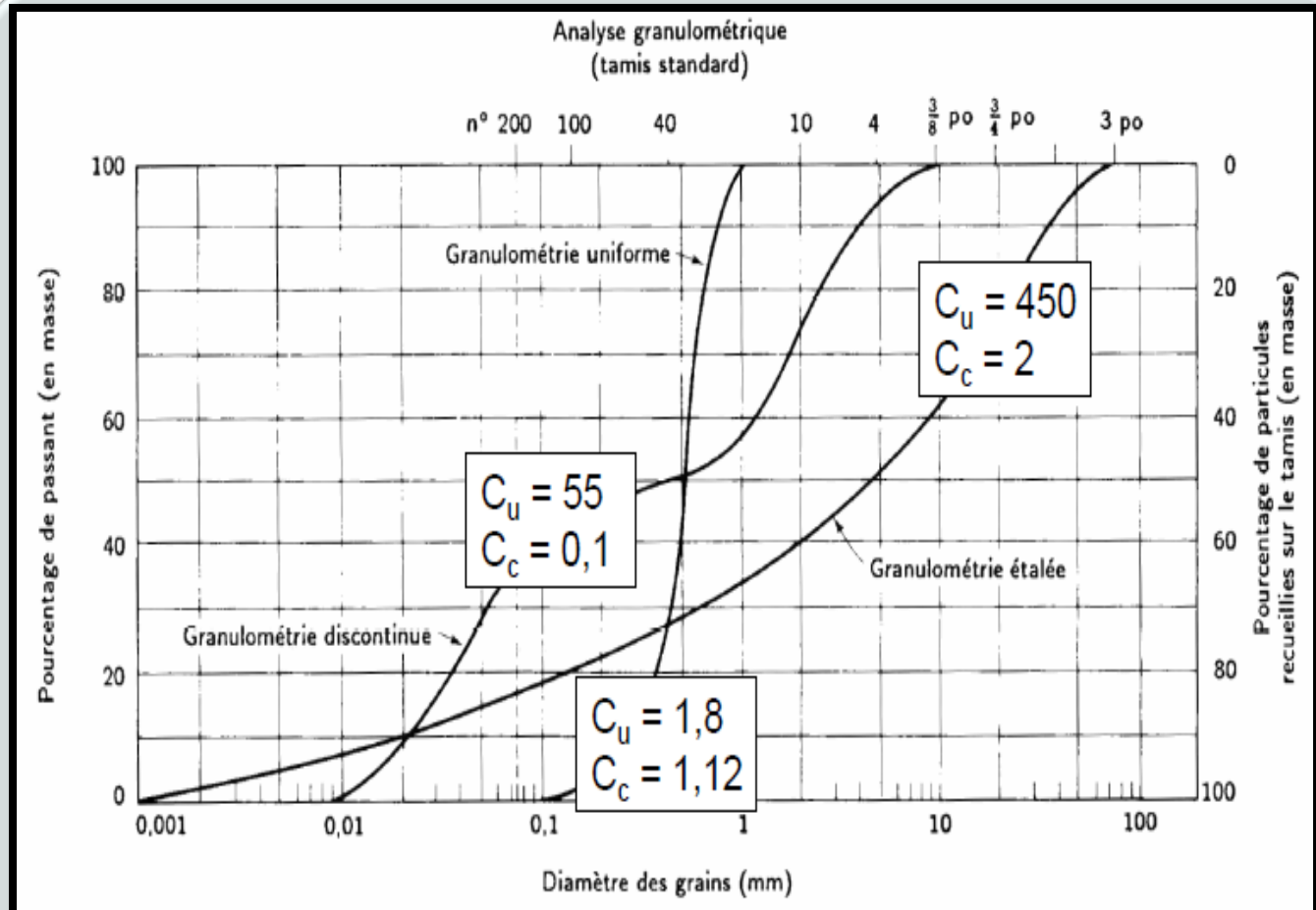
Paramètres caractéristiques  
des sols (dimensionnelles)

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure



Un exemple d'une analyse granulométrique (courbe  
granulométrique)

Description

Paramètres d'état  
des sols

Paramètres caractéristiques  
des sols (dimensionnelles)

Généralités  
&  
définitions

Processus  
géologique de  
formation des  
sols

Différentes  
phases  
constitutives  
d'un sol

Caractéristiques  
physiques et  
dimensionnelles  
des sols et leur  
mesure

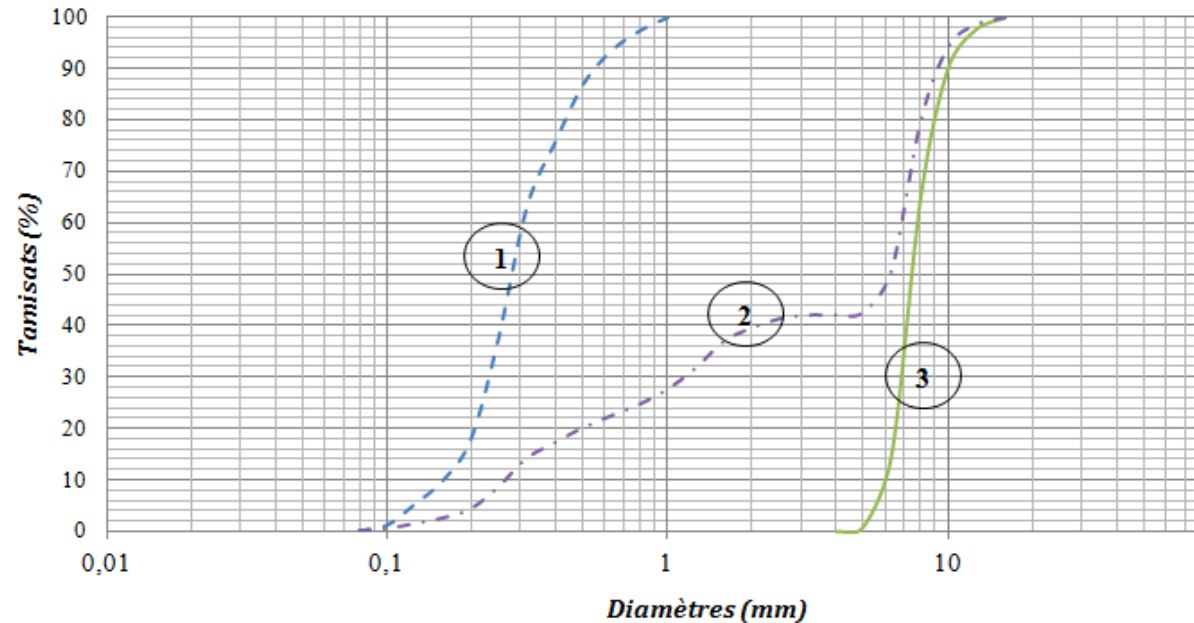
### Exercice d'application 3:

Pour les courbes granulaires suivantes:

-Déterminer :

- Le diamètre efficace ;
- Le coefficient d'uniformité ;
- Le coefficient de courbure.

-Commenter les résultats





## **ESSAIS D'IDENTIFICATION DES SOLS: SOL FINS & SOLS GREUS**

# ch2

**-ESSAI D'ÉQUIVALENT DE SABLE  
&  
INDICE DE VIDE**

**-LES LIMITES D'ATTERBURG**



## Essai équivalent de sable

## Indice de densité

### Essais d'identification – sols grenus

#### Définition:

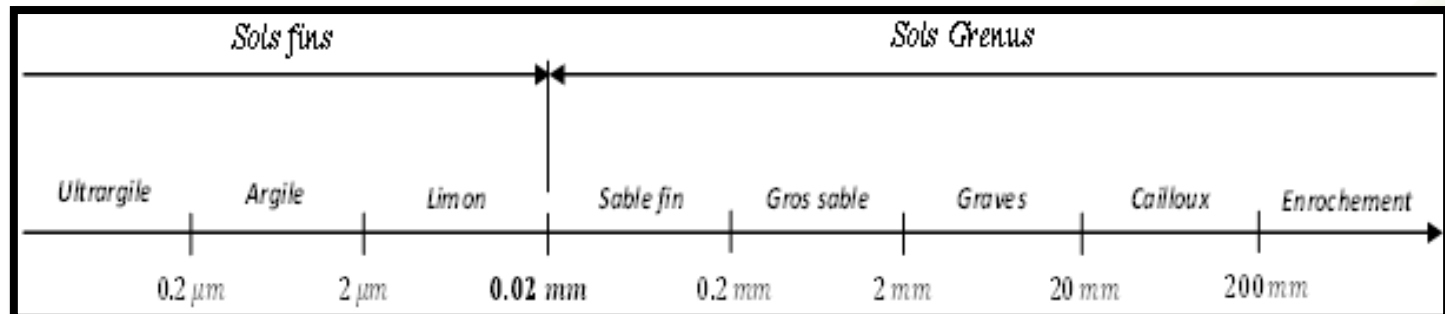
- L'essai équivalent de sable, désigné par le symbole **E.S.**, est un essai spécifique des sols grenus.
- Cet essai caractérise la propreté du sol ou par opposition le degré de pollution du sol par la phase argileuse ou limoneuse présente.

#### But:

Évaluer la proportion relative d'éléments fins contenus dans le sol et dont la présence en quantité notable peut modifier le comportement mécanique.

- C'est un essai simple, rapide et ne nécessitant qu'un appareillage très élémentaire.
- Il est très largement utilisé, en particulier en géotechnique routière.

### Essais d'identification – sols fins



## Essai équivalent de sable

## Indice de densité

**Essais  
d'identification  
– sols grenus**

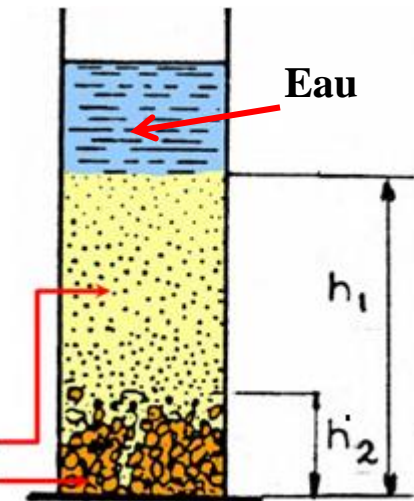
**Essais  
d'identification  
– sols fins**

### Principe:

-On place dans une éprouvette graduée un volume donné d'un échantillon de sol, puis un mélange d'eau et de solution flocculant (lavage énergétique avec solution lavante) destinée à mettre en suspension les fines argileuses. Après agitation et repos, on mesure  $h_1$  et  $h_2$  et on calcule E.S.:

$$E.S. = \frac{h'_2}{h_1} \cdot 100$$

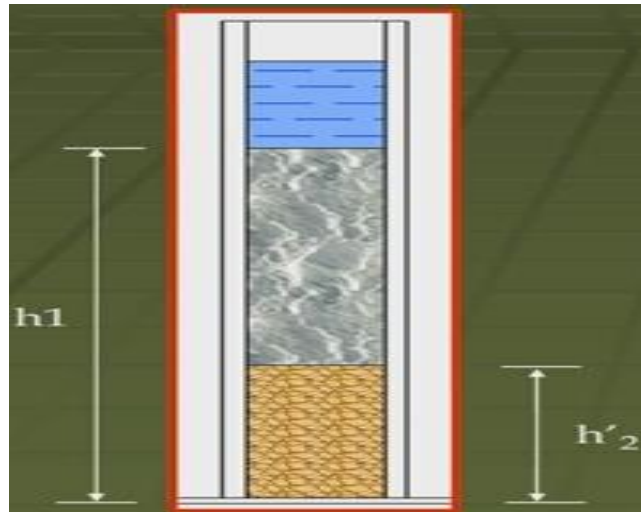
Floculat gonflé par la solution (particules fines)  
Dépôt solide (sable) au fond de l'éprouvette après repos



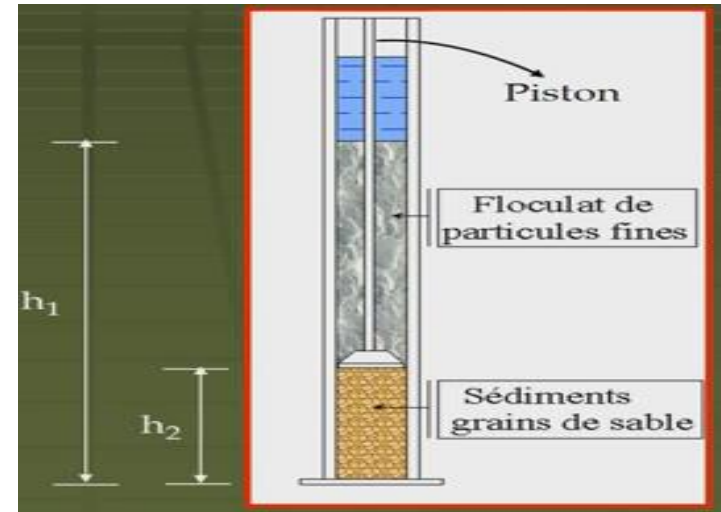
## Essai équivalent de sable

## Indice de densité

### Essais d'identification – sols grenus



$$E.S_v. (\text{visuel}) = \frac{h'_2}{h_1} \cdot 100$$



$$E.S. (\text{piston}) = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100$$

### Valeurs de E.S. et observations

E.S.	OBSERVATIONS
$\cong 100$	Sable de laboratoire - inexistant à l'état naturel
70 à 80	Sable exceptionnel et très propre - apte à la confection des bétons
60 à 70	Sable légèrement argileux - excellent en technique routière
50	Limite inférieure d'emploi en couche de base
20 à 25	Sable très argileux - impropre aux couches de chaussées.

### Exemple:

On donne:

$h_2 = 25 \text{ mm}$

$h_1 = 30 \text{ mm}$

On demande de:

calculer l'équivalent de sable et commenter le résultat



## Essai équivalent de sable

## Indice de densité

Essais  
d'identification  
– sols grenus

### Rappel:

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

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

-Pour un sol lâche:  $I_d$  est voisin de 0.  
-Pour un sol serré:  $I_d$  est voisin de 1.

### Détermination de états de compacité extrêmes:

$e_{\min}$  et  $e_{\max}$  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:

[L'essai consiste à mettre en place le matériau séché dans un moule de volume connu, selon une procédure bien définie. On peut ainsi calculer son poids volumique minimal. Une surcharge statique de 10 kPa est ensuite appliquée afin de procéder au compactage de l'échantillon par vibration. On calcule alors son poids volumique maximal].

=>Le comportement des sols grenus dépend presque uniquement de l'état de compacité dans lequel se trouve le squelette solide.

Etats de consistance  
d'un sol

Limites  
d'ATTERBURG

Indices de plasticité  
& liquidité & consistance

Essais  
d'identification  
– sols grenus

Essais  
d'identification  
– sols fins

- La particularité des **sols fins** est que, leur **consistance varie** fortement en fonction de leur **teneur en eau**.
- Leur état va du **solide** s'ils sont **desséchés**, à l'état **liquide** s'ils sont **détrempés**. Entre ces 2 états, il existe un état intermédiaire dit **plastique** (pâte à modeler).

VARIATION DE LA CONSISTANCE DES  
ARGILES AVEC LA TENEUR EN EAU



ETAT  
SOLIDE



ETAT  
PLASTIQUE



ETAT  
LIQUIDE

Etats de consistance  
d'un sol

Limites  
d'ATTERBURG

Indices de plasticité  
& liquidité & consistance

Essais  
d'identification  
– sols grenus

Essais  
d'identification  
– sols fins

### Limites d'ATTERBURG :

-Les limites d'Atterberg (ou **limites de consistance**) sont des constantes physiques conventionnelles (teneur en eau pondérale) qui marque les seuils entre :

- Le passage d'un sol de **l'état liquide** à **l'état plastique** (**limite de liquidité  $\omega_L$** ).
- Le passage d'un sol de **l'état plastique** à **l'état semi-solide** (avec retrait) (**limite de plasticité  $\omega_P$** ).
- Le passage d'un sol de **l'état semi-solide** (avec retrait) à **l'état solide** (sans retrait) (**limite de retrait  $\omega_s$** ).

-La **limite de retrait  $\omega_s$**  : est la teneur en eau maximale que le sol peut avoir sans changer de volume. Cette limite sépare l'état solide de l'état semi-solide.

-La **limite de plasticité  $\omega_P$**  : on la définit comme la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à de faibles charges.

-La **limite de liquidité  $\omega_L$**  : est la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique.

-Ces limites s'expriment en **pourcentages** et s'appliquent sur la fraction de sol passant au travers du tamis de **400  $\mu m$** .



## Etats de consistance d'un sol

## Limites d'ATTERBURG

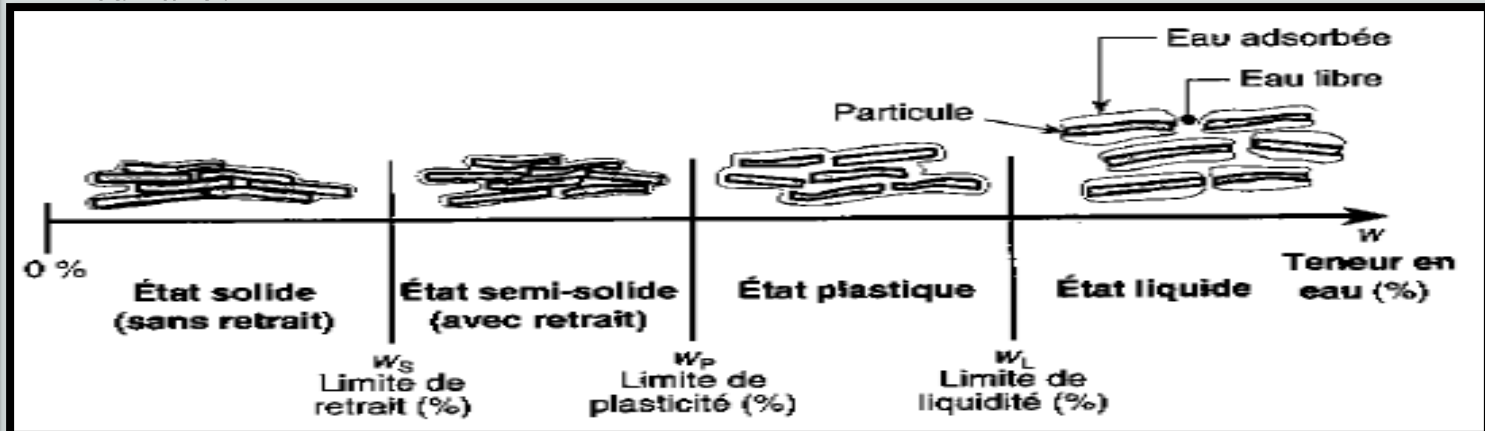
## Indices de plasticité & liquidité & consistance

### Essais d'identification – sols grenus

### Essais d'identification – sols fins

#### Limites d'ATTERBURG :

-Les limites définies par ATTERBERG sont les teneurs en eau particulières permettant de distinguer les divers états des sols fins, comme le montre le graphe suivant :



-Les limites de plasticité et de liquidité servent à identifier et à classer les sols à grains fins. Quant à la limite de retrait, elle sert à l'étude de certains sols dont le volume varie fortement à cause des changements de la teneur en eau.

Alors, on peut considérer 4 états caractérisant la consistance des sols fins pour des teneurs en eau croissantes:

- L'état solide sans retrait
- L'état semi-solide avec retrait
- L'état plastique
- L'état liquide

## Etats de consistance d'un sol

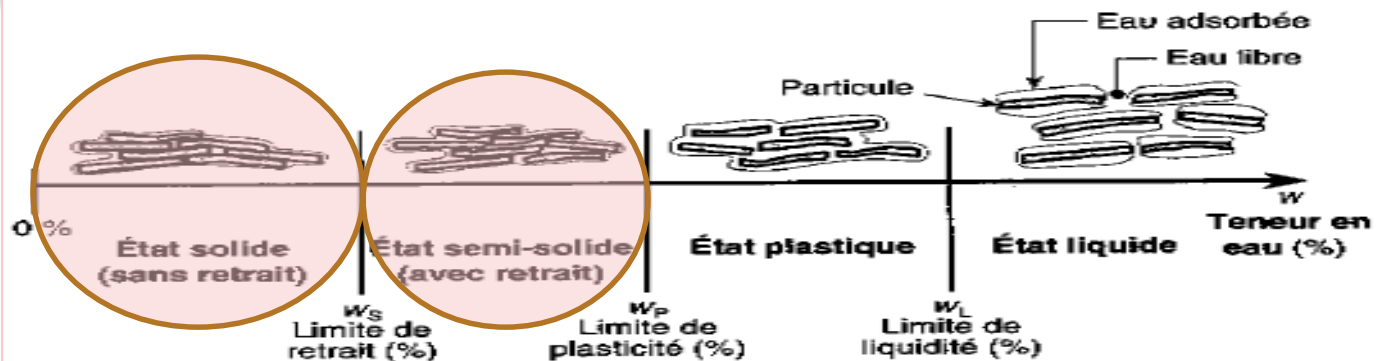
## Limites d'ATTERBURG

## Indices de plasticité & liquidité & consistance

Essais d'identification – sols grenus

Essais d'identification – sols fins

**-L'état solide (sans retrait):** ses particules sont en contact les unes avec les autres, et les films d'eau adsorbée sont très minces et se touchent : il n'y a pas d'eau libre entre les particules. L'assèchement du sol ne produit aucun retrait. Le sol manifeste une très grande résistance au cisaillement et, sous l'effet d'une charge, les déformations sont faibles avant qu'il ait rupture. Son volume est indépendant de la teneur en eau si celle-ci reste inférieure à la limite de retrait  $\omega_s$ .



Solide

**-L'état semi-solide (avec retrait):** Le sol a une faible teneur en eau, et les liens de cohésion entre ses particules sont très forts. Les films d'eau adsorbée, quoique encore minces, séparent légèrement les particules, de telle sorte qu'un assèchement du sol causerait un retrait. Il s'ensuit que les déformations du sol provoquées par des charges sont toujours accompagnées de fissures. son volume change avec la teneur en eau si celle-ci varie entre la limite de retrait  $\omega_s$  et la limite de plasticité  $\omega_p$ .

## Etats de consistance d'un sol

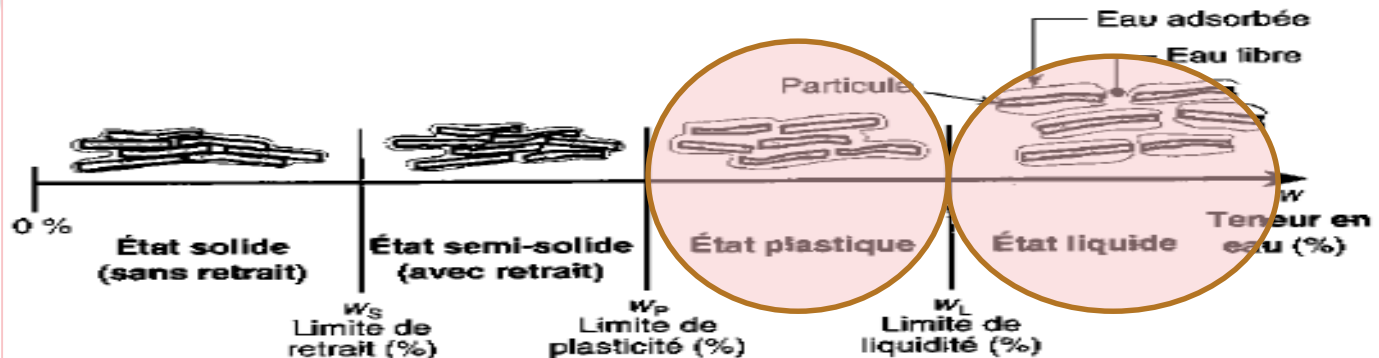
## Limites d'ATTERBURG

## Indices de plasticité & liquidité & consistance

### Essais d'identification – sols grenus

### Essais d'identification – sols fins

**-L'état plastique:** sa teneur en eau est plus grande et ses particules sont plus éloignées les unes des autres. Les particules ont mis en commun leurs couches adsorbées; la cohésion du sol est plus faible qu'à l'état semi-solide. Sous de petites charges, le sol se déforme largement sans fissures pour une teneur en eau comprise entre la limite de plasticité  $\omega_P$  et la limite de liquidité  $\omega_L$ . Il garde sa déformation après suppression des contraintes. Sa consistance varie de celle du beurre mou à celle du massif ferme : c'est un sol qu'on peut façonner à la main.



**-L'état liquide:** Lorsque le sol est à l'état liquide, sa teneur en eau est si élevée qu'il n'existe pratiquement plus aucune cohésion entre les particules, qui sont entourées de leur film d'eau adsorbée et isolées les unes des autres par l'eau libre. Le sol peut alors se comporter comme un liquide visqueux (les particules glissent facilement les unes sur les autres) d'une consistance variant de celle de la soupe aux pois à celle du beurre mou.





Etats de consistance  
d'un sol

Limites  
d'ATTERBURG

Indices de plasticité  
& liquidité & consistance

Essais  
d'identification  
– sols grenus

• Mode opératoire:

Concernant les modes opératoires pour la détermination de ces paramètres, il existe des normes qui précisent les procédures et les conditions à respecter pour chaque essai.

• Détermination de la limite de liquidité  $\omega_L$ :

Deux méthodes différentes peuvent être utilisées pour déterminer:

-1<sup>ère</sup> Méthode (Méthode de Casagrande)

-2<sup>ème</sup> Méthode (Méthode du cône de pénétration)

• Détermination de la limite de plasticité  $\omega_P$ :

-Essai (petits rouleaux)

• Détermination de la limite de retrait  $\omega_s$

Essais  
d'identification  
– sols fins

Etats de consistance  
d'un sol

Limites  
d'ATTERBURG

Indices de plasticité  
& liquidité & consistance

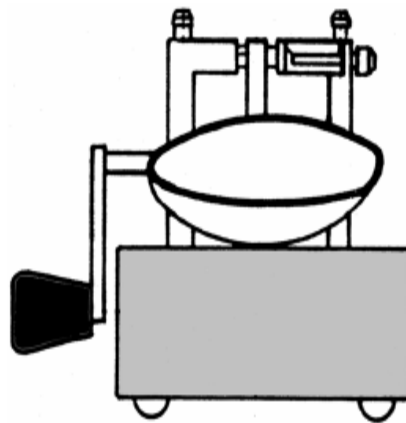
Essais  
d'identification  
– sols grenus

Essais  
d'identification  
– sols fins

• Détermination de la limite de liquidité  $\omega_L$ :

- **1<sup>ère</sup> Méthode (Méthode de Casagrande):**

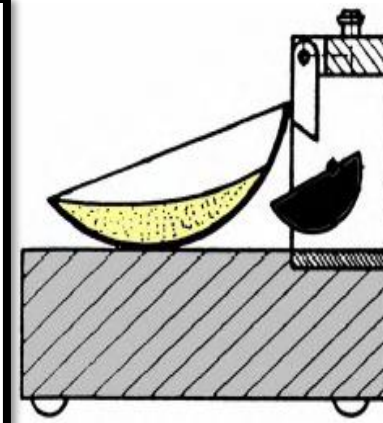
- On étend sur une **coupelle** une **couche du matériau** dans laquelle on **trace** une **rainure** au moyen d'un instrument de forme de V.
- On imprime à la coupelle des **chocs semblables** en **comptant** le **nombre** de **chocs** nécessaires pour **fermer** la **rainure** sur **1 cm**.
- On **mesure** alors la **teneur en eau** de la pâte.



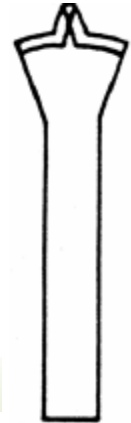
Coupelle vue de face



Image d'une Coupelle



Coupelle vue de côté



Outil à  
rainurer

Appareillage pour la détermination de la limite de liquidité

## Etats de consistance d'un sol

## Limites d'ATTERBURG

## Indices de plasticité & liquidité & consistance

### Essais d'identification – sols grenus

### Essais d'identification – sols fins



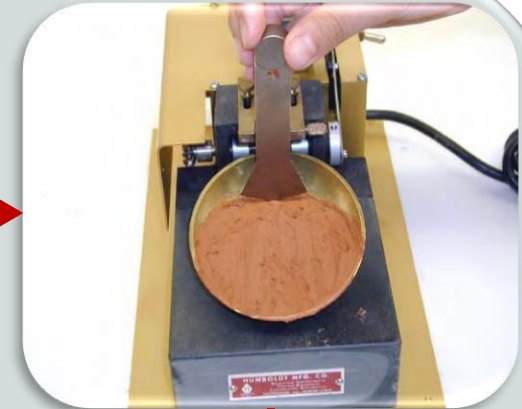
Mettre en place l'échantillon de sol  
dans la coupelle



- Enregistrer le nombre de chocs
- Déterminer la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure.

Tourner la manivelle de  
l'appareil pour donner  
des chocs à la coupelle

⇒ jusqu'à la fermeture  
de la rainure sur 1 cm



Tracer un sillon avec l'outil à rainurer



Etats de consistance  
d'un sol

Limites  
d'ATTERBURG

Indices de plasticité  
& liquidité & consistance

Essais  
d'identification  
– sols grenus

Essais  
d'identification  
– sols fins

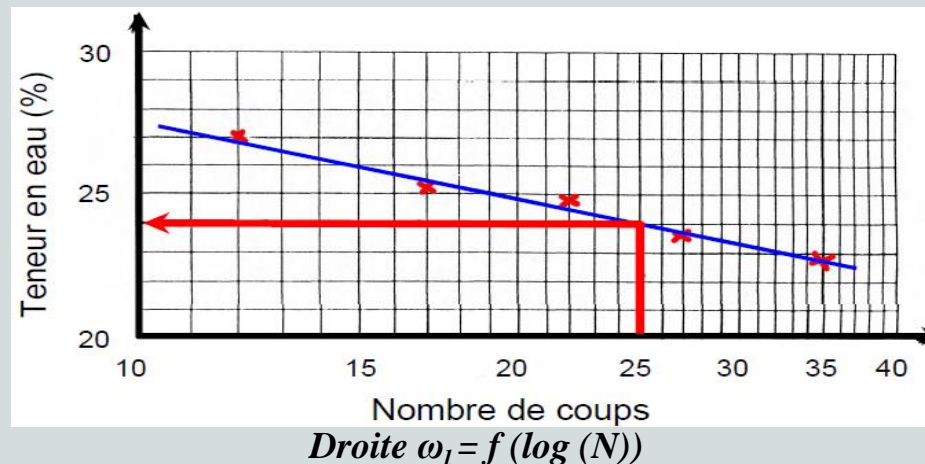
La limite de liquidité  $\omega_L$ :

Par convention, la limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond à une fermeture de 1 cm des lèvres de la rainure après 25 chocs .

La limite de liquidité est donnée, en fonction du nombre de coups  $N$  pour obtenir cette fermeture, par la formule :

$$\omega_L = \omega \left( \frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad [\%] \quad N \in [15, 35]$$

En pratique, Il est également possible de réaliser plusieurs tentatives de l'essai et déterminer graphiquement la limite de liquidité sur la droite  $\omega = f(\log(N))$ :



Etats de consistance  
d'un sol

Limites  
d'ATTERBURG

Indices de plasticité  
& liquidité & consistance

Essais  
d'identification  
– sols grenus

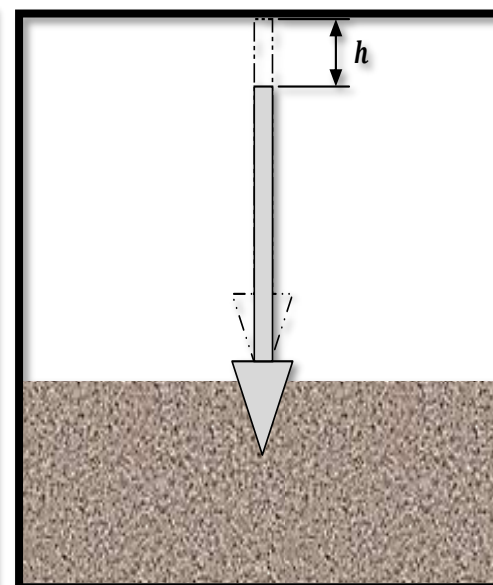
Essais  
d'identification  
– sols fins

• Détermination de la limite de liquidité  $\omega_L$ :

-2<sup>ème</sup> Méthode (Méthode du cône de pénétration):

Cette méthode consiste à mesurer, après un temps précis, l'enfoncement d'un cône, sous son poids, dans un échantillon de sol remanié.

La limite de liquidité, conventionnellement, est la teneur en eau du sol qui correspond, à un enfoncement (une profondeur de pénétration) du cône de  $h = 17 \text{ mm}$



Pénétromètre

**Etats de consistance  
d'un sol**

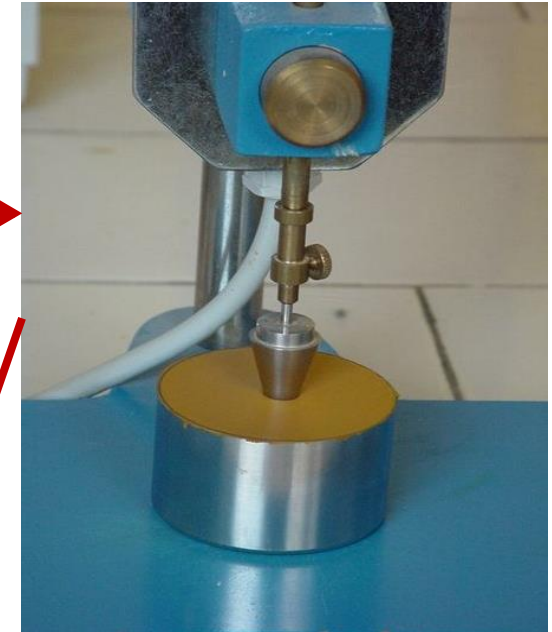
**Limites  
d'ATTERBURG**

**Indices de plasticité  
& liquidité & consistance**

**Essais  
d'identification  
– sols grenus**



Mettre en place l'échantillon de sol  
dans la coupelle



Mesure de l'enfoncement du cône de  
pénétromètre appliqué sur l'échantillon  
de sol

**Essais  
d'identification  
– sols fins**



Détermination de la teneur en eau

Détermination de la limite de liquidité  $\omega_L$  par la méthode du cône de pénétration



Etats de consistance  
d'un sol

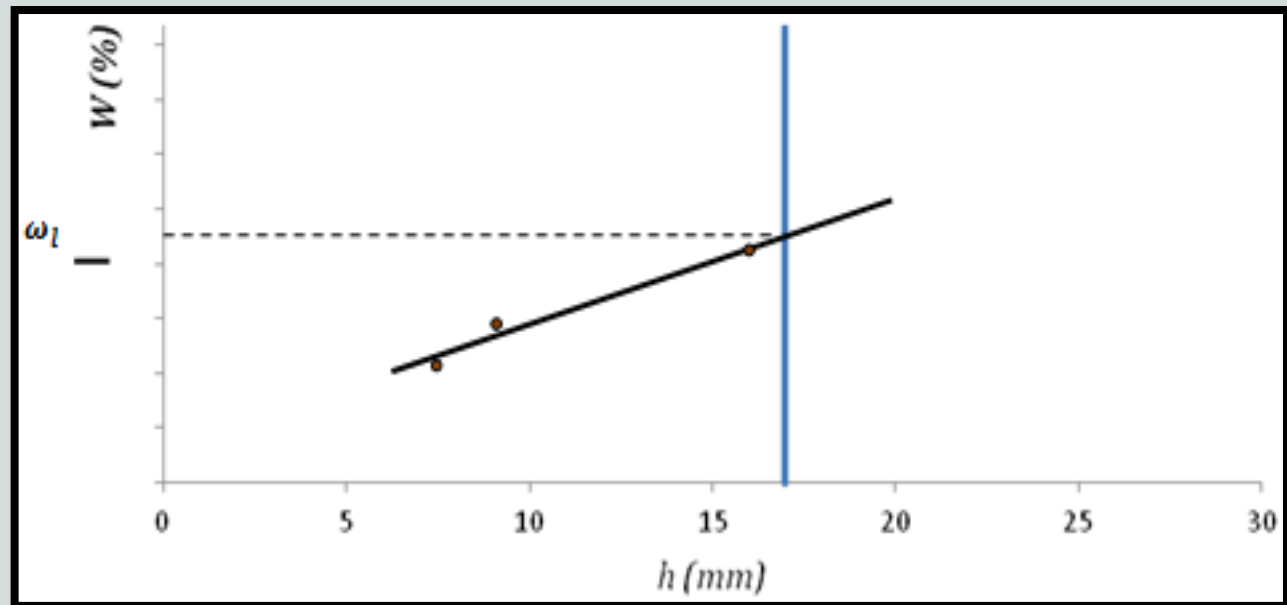
Limites  
d'ATTERBURG

Indices de plasticité  
& liquidité & consistance

Essais  
d'identification  
– sols grenus

Essais  
d'identification  
– sols fins

La relation entre la **teneur en eau du sol remanié** et la **pénétration**, sous son propre poids d'un cône normalisé (angle au sommet de  $30^\circ$  et de masse de 80 g), tombée en chute libre, est **déterminé expérimentalement** à partir de la **droite moyenne ajustée** sur les couples **(h,  $\omega$ )**.



*Droite  $\omega_l = f(h)$*

## Etats de consistance d'un sol

## Limites d'ATTERBURG

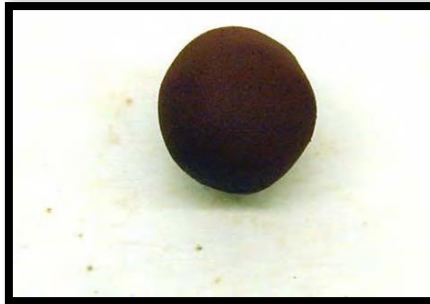
## Indices de plasticité & liquidité & consistance

### Essais d'identification – sols grenus

### Essais d'identification – sols fins

#### • Détermination de la limite de plasticité $\omega_p$ :

- On cherche la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimensions fixées et confectionné manuellement, se fissure.
- Pour ce faire, à partir d'une boulette d'échantillon que l'on roule sur un marbre à la main (ou avec une plaque), on forme un rouleau aminci progressivement jusqu'à 3 mm de diamètre sur une longueur de 10 à 15 cm.



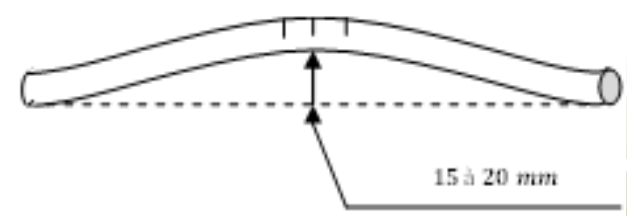
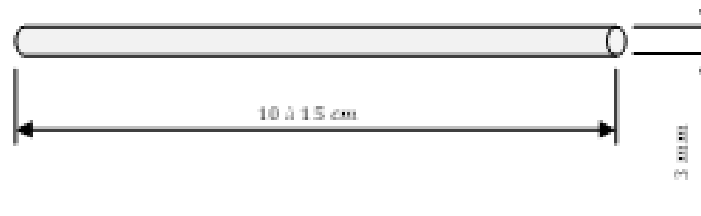
Boulette d'échantillon de sol



Confectionner le rouleau de sol manuellement sur une marbre



Rouleau de sol fissuré



Détermination de la limite de plasticité

=> Par convention, la limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau, soulevé par le milieu de 1 à 2 cm, se fissure.

## Etats de consistance d'un sol

## Limites d'ATTERBURG

## Indices de plasticité & liquidité & consistance

### Essais d'identification – sols grenus

### Essais d'identification – sols fins

#### • Détermination de la limite de retrait $\omega_s$ :

Une **pâte homogène** est réalisé à partir du passant au tamis de **400  $\mu\text{m}$**  avec une **teneur en eau prise proche de la limite de liquidité**.

• L'essai consiste à déterminer pour une prise d'essai :

- La **masse initiale**,  $m_h$ ;
- Le **volume initial**,  $V_h$ ;
- La **masse après dessiccation complète par étuvage**,  $m_d$ ;
- Le **volume après dessiccation complète par étuvage**,  $V_d$ .



• Par convention, la **perte de volume** de la prise d'essai entre son **état saturé** et son **état sec** est égale au **volume d'eau perdu** jusqu'à la limite de retrait.

Donc : 
$$\omega_s = \frac{m_h - \rho_w(V_h - V_d)}{m_d} - 1 \text{ [%]}$$

• Cet essai est réalisé sur **trois prises d'essai**, la **limite de retrait définitive** est prise égale à la **moyenne des trois valeurs** déterminées.



## Etats de consistance d'un sol

## Limites d'ATTERBURG

## Indices de plasticité & liquidité & consistance

Essais  
d'identification  
– sols grenus

Essais  
d'identification  
– sols fins

A partir des paramètres définis précédemment, on définit:

▪ L'indice de plasticité par :  $I_p = \omega_l - \omega_p$  [%]

Exprimé en **pourcentage**. Il correspond à la **différence** entre la **limite de liquidité** et la **limite de plasticité**. Il permet de **déterminer** une **zone** dans laquelle on **considérera** que ce **sol** est à l'état **plastique**.

▪ L'indice de consistance par :  $I_c = \frac{\omega_l - \omega}{I_p}$  [sans unité]

Il **permet** de **savoir** rapidement si un **sol** est à l'état **liquide** ( $I_c \leq 0$ ), **plastique** ( $0 < I_c < 1$ ), **semi-solide** ou **solide** ( $I_c > 1$ ).

-Pour établir cet indice, on **compare** la **teneur en eau naturelle** (**in situ**) ( $\omega$ ) d'un sol à ses **limites de plasticité** et de **liquidité**.

▪ L'indice de liquidité par :  $I_l = \frac{\omega - \omega_p}{I_p}$  [sans unité]

Le complément à 1 de l'indice de consistance:

$$I_L = \frac{\omega - \omega_p}{I_p} = \frac{\omega - \omega_p}{\omega_L - \omega_p} = 1 - I_c$$

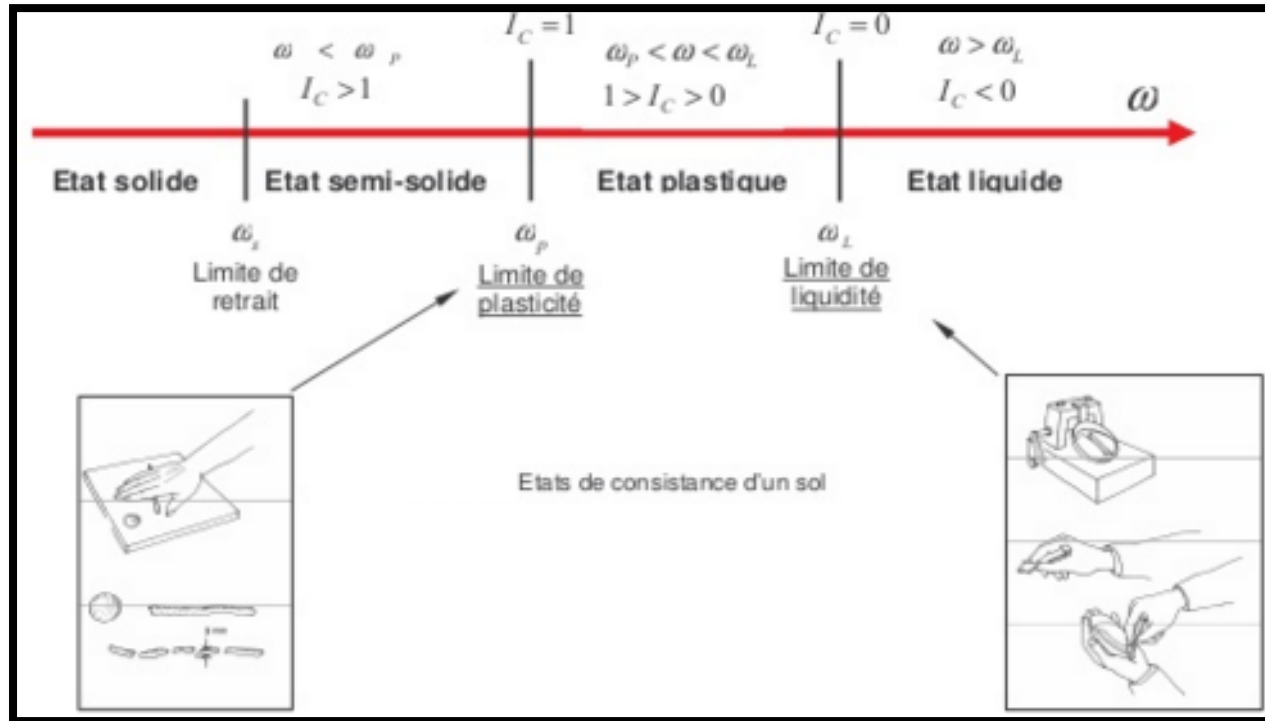
Etats de consistance  
d'un sol

Limites  
d'ATTERBURG

Indices de plasticité  
& liquidité & consistance

Essais  
d'identification  
– sols grenus

Essais  
d'identification  
– sols fins



Limites d'Atterberg , indice de liquidité et de plasticité

Le chapitre suivant (classification des sols fins) est faite sur la base de ces paramètres. Quant aux sols grenus, la classification dépend également de la granulométrie.

## Etats de consistance d'un sol

## Limites d'ATTERBURG

## Indices de plasticité & liquidité & consistance

### Essais d'identification – sols grenus

### Essais d'identification – sols fins

#### → Activité d'argile:

Elle est égale au **rapport** entre son **indice de plasticité** et la **fraction d'argile présente** dans un **sol** donné :

$$A = \frac{I_p}{\text{fraction d'argile}}$$

La **fraction d'argile** correspond au **pourcentage** que **présente** dans le **sol** le **poids** des **particules** dont le **diamètre** équivalent est **inférieur** à **0.002 mm**:

$$\text{fraction d'argile} = \frac{\text{poids} < 2 \mu\text{m}}{\text{poids total sec} (< 0,4 \text{ mm})}$$

Les observations démontrent que **l'activité d'une argile** est **constante** et que chaque **type d'argile** à une **activité** qui lui est **propre**.

Nature	Activité	
Kaolinite	0,38	(inactive)
Illite	0,9	(normale)
Montmorillonite	7,2	(active)



## Etats de consistance d'un sol

## Limites d'ATTERBURG

## Indices de plasticité & liquidité & consistance

### • Ordre de grandeurs:

**Essais d'identification – sols grenus**

### Degré de plasticité en fonction $I_p$

INDICE DE PLASTICITÉ (%)	DEGRÉ DE PLASTICITÉ
$0 < I_p < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 \leq I_p < 15$	Peu plastique
$15 \leq I_p < 40$	Plastique
$I_p \geq 40$	Très plastique

### Etat de consistance du sol en fonction $I_c$

INDICE DE CONSISTANCE	CONSISTANCE DE SOL
$I_c \leq 0$	Liquide
$0 \leq I_c < 1$	Plastique
$I_c = 1$	Solide plastique
$I_c > 1$	Solide ou semi solide

### Etat de consistance du sol en fonction $I_L$

INDICE DE LIQUIDITÉ	CONSISTANCE DE SOL
$I_L < 0$	Très dure
$0 < I_L \leq 1$	Dure à très plastique
$I_L > 1$	Fluide

**Essais d'identification – sols fins**

**Etats de consistance  
d'un sol**

**Limites  
d'ATTERBURG**

**Indices de plasticité  
& liquidité & consistance**

**Essais  
d'identification  
– sols grenus**

**Essais  
d'identification  
– sols fins**

### Exercice d'application 4:

Sur deux échantillons de sols provenant de deux sites différents, des essais de détermination de la teneur en eau et des limites d'Atterberg ont été réalisés.

Les résultats de ces essais sont donnés par le tableau suivant :

Sol	$\omega$ [%]	$\omega_p$ [%]	$\omega_l$ [%]
Sol (1)	20	13	34
Sol (2)	10	16	30

- (1) Calculer les indices de plasticité, de consistance et de liquidité.
- (2) Commenter vos résultats.

## Autres essais (à rechercher)

**Valeur au bleu  
de Méthylène  
(VBS)**

**Analyse  
minéralogique**

**Teneur en  
matière  
organique**

**Teneur en  
carbonate de  
calcium ( $\text{CaCO}_3$ )**

Cet essai est une **mesure** indirecte de la **surface spécifique** des **grains solides** par **adsorption** d'une **solution de bleu de méthylène** jusqu'à saturation. En d'autres termes, il exprime la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par les surfaces, internes et externes, des particules de sols.

Les résultats VBS s'exprime donc en grammes de bleu pour 100 g de sol.

On considère que cet essai exprime globalement la quantité de l'argile contenue dans un sol.

On distingue les valeurs suivantes:

- $\text{VBS} \leq 0,2$**  : sols sableux (sol insensible à l'eau)
- $0,2 < \text{VBS} \leq 2,5$**  : sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau)
- $2,5 < \text{VBS} \leq 6$**  : sols limono-argileux (sol de plasticité moyenne)
- $6 < \text{VBS} \leq 8$**  : sols argileux
- $\text{VBS} > 8$**  : sols très argileux



## Autres essais (à rechercher)

Valeur au bleu  
de Méthylène  
(VBS)

Analyse  
minéralogique

Teneur en  
matière  
organique

Teneur en  
carbonate de  
calcium ( $\text{CaCO}_3$ )

L'analyse minéralogique fait appel à l'observation au microscope électronique, à l'étude par diffraction des rayons X et à l'analyse chimique. L'analyse minéralogique d'un sol est généralement un essai qui apporte beaucoup d'informations, car le comportement des sols fins est en fonction de leur composition minéralogique.

C'est le quotient de la masse de matières organiques contenues dans le sol par la masse totale des particules solides minérales et organique. Les matières organiques sont très variées et il est impossible de déterminer par des essais simples. Plusieurs méthodes de dosages sont possibles (Méthode classique, Méthode thermique et Test d'humidification de Von Post)

La teneur en  $\text{CaCO}_3$  d'un sol fin est un bon indice de sa résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau. La teneur pondérale en carbonates est le rapport entre la masse de carbonate contenue dans le sol à sa masse sèche totale. Sa détermination se fait par décomposition du  $\text{CaCO}_3$  contenu dans le sol par l'acide chlorhydrique. Suivant la valeur de cette teneur, le comportement sol évolue depuis celui d'une argile jusqu'à celui d'une roche.

Teneur en $\text{CaCO}_3$ (%)	Désignation géotechnique
0 - 10	Argile
10 - 30	Argile marneuse
30 - 70	Marne
	} Sols
70 - 90	Calcaire marneux
90 - 100	Calcaire
	} Roches



# Ch3

**CLASSIFICATION DES SOLS**

## Intérêt

## Différentes systèmes de classification des sols

### classification géotechnique des sols

Classer un sol consiste à l'identifier grâce à des mesures quantitatives et à lui donner un nom afin de le rattacher à un groupe de sols de caractéristiques semblables.

❑ Les systèmes de classification des sols sont nés du besoin des ingénieurs civils de disposer de renseignements suffisamment fiables sur le comportement des sols pour pouvoir prendre des décisions rapides et efficaces, surtout dans les domaines de construction routière et des infrastructures des pistes d'atterrissage ou des barrages.

❑ Les systèmes de classification des sols ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines.

### La classification LCPC

### Procédures d'identification des sols



## Intérêt

## Différentes systèmes de classification des sols

Il existe de très nombreux systèmes de classification des sols :

**classification  
géotechnique  
des sols**

- ❑ Systèmes basés sur l'aptitude du sol pour un emploi particulier du génie civil. Ces classifications présentent en général l'inconvénient de ne pouvoir être étendues à d'autres usages que celui pour lequel elles ont été établies .  
Exemple: GTR (remblais et couches de forme)

- ❑ Systèmes basés sur certains essais d'identification.

- Systèmes se réfèrent uniquement à la **granularité du sol** (diagramme triangulaire, par exemple) et diffèrent par les seuils granulométriques adoptés .

- Systèmes utilisent simultanément la **granularité** et la **plasticité du sol**. On décrira ici l'une de ces classifications, dite «**classification des laboratoires des ponts et chaussées**» ou «**classification LPC**», qui est proche à la classification américaine **USCS (Unified Soil Classification System)**, utilisée en France s'appuie sur essentiellement l'analyse granulométrique et sur les caractéristiques de plasticité de la fraction fine (Limites d'Atterbeg), complétée par des essais très simples (couleur, odeur, effets de l'eau, etc.).

**La classification  
LCPC**

**Procédures  
d'identification  
des sols**

## Principe

## Sols à granulométrie uniforme

## Sols à granulométrie non uniforme

### La classification LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Elle utilise les résultats d'essais classiques d'identification des sols:

- Des critères granulométriques :

- Les pourcentages de gravier, sable et particules fines;

- La forme de la courbe granulométrique : Le coefficient d'uniformité  $C_u$  et coefficient de courbure  $C_c$ .

- Des caractéristiques de plasticité :

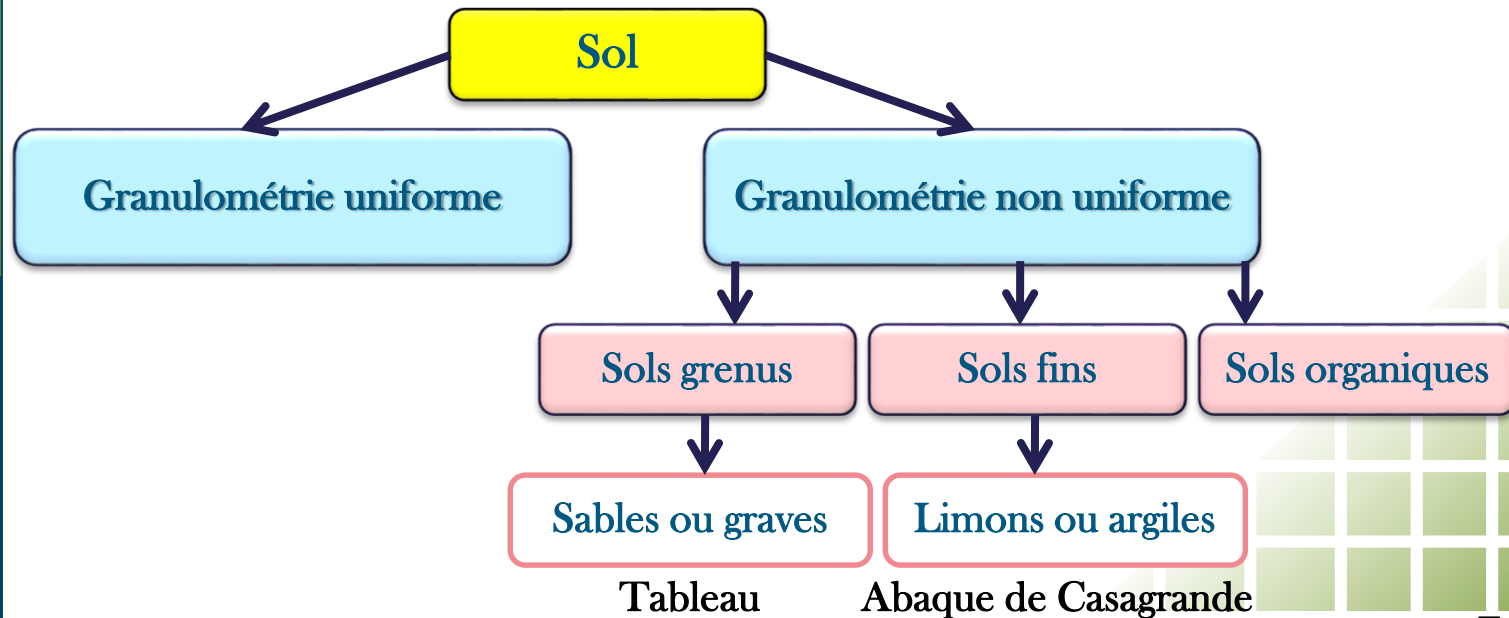
$\omega_L$  et  $I_P$ , et la ligne A d'équation :  $I_P = 0,73 (w_L - 20)$  (relation de Casagrande).

- La teneur en matières organiques.

classification  
géotechnique  
des sols

La classification  
LCPC

Procédures  
d'identification  
des sols



## Principe

## Sols à granulométrie uniforme

## Sols à granulométrie non uniforme

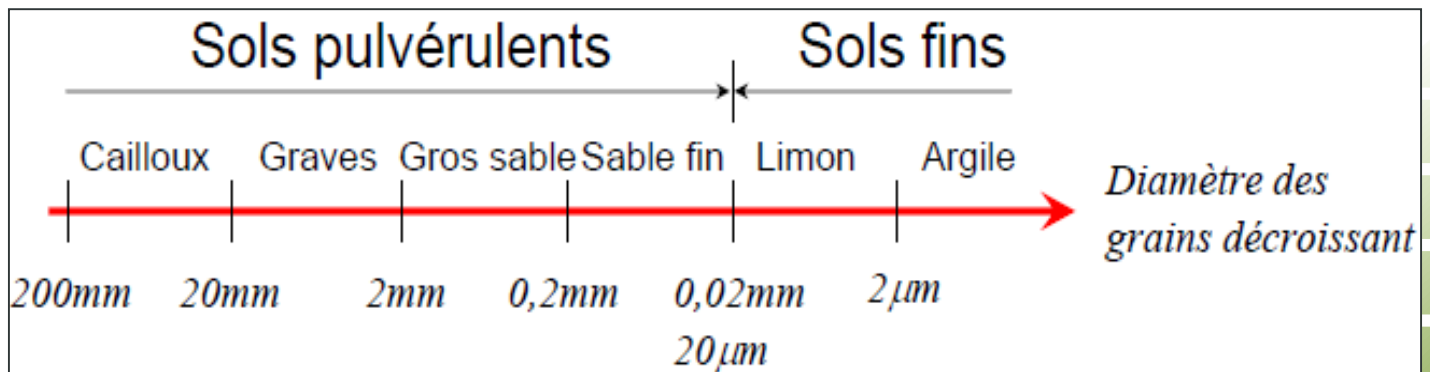
### □ Classification pour les sols à granulométrie uniforme:

Classification reposant sur le **diamètre moyen** des **grains**:

Lorsque les **dimensions des grains** sont **peu différentes**, on adopte la classification déjà donnée:

- Sols pulvérulents (grenus) :  $d_{\text{moy}} > 20 \mu$  (cailloux; Graves gros; sable; sable fin).
- Sols cohérents (fins) :  $d_{\text{moy}} < 20 \mu$  (limon, argile).

En fait les limons ne se différencient des argiles que par les valeurs des limites d'ATTERBERG comme indiqué ci-après:



classification  
géotechnique  
des sols

La classification  
LCPC

Procédures  
d'identification  
des sols



## Principe

## Sols à granulométrie uniforme

## Sols à granulométrie non uniforme

### classification géotechnique des sols

#### ☐ Classification pour les sols à granulométrie non uniforme:

On distingue **trois** grands types de sols:

- **Les sols fins**: plus de 50 % des éléments en poids  $< 80 \mu\text{m}$ ,
- **Les sols grenus**: plus de 50 % des éléments en poids  $> 80 \mu\text{m}$ ,
- **Les sols organiques** : ont la teneur en matières organiques  $> 10 \%$ .

On définit un sol par **deux symboles**:

#### ☐ Le premier symbole: tient compte de la nature des éléments constituant le sol:

- **G** : pour **Grave** , quand **la grave** constitue la fraction principale du sol;
- **S** : pour **Sable**, quand **le sable** constitue la fraction principale du sol;
- **L** : pour **Limon**, quand **le limon** constitue la fraction principale du sol;
- **A** : pour **Argile**, quand **l'argile** constitue la fraction principale du sol;
- **O** : pour **Organique**, quand l'échantillon contient des éléments organiques, même en faible quantité.

#### ☐ Le deuxième symbole: tient compte de: la granularité du sol:

- **b** : **bien** graduée, c'est à dire granulométrie **bien étalée**, **sans** prédominance d'une fraction particulière;
- **m** : **mal** graduée, c'est à dire granulométrie **discontinue**, **avec** prédominance d'une fraction particulière;

ou la plasticité du sol:

**t** : **très** plastique

**p**: **peu** plastique

### La classification LCPC

### Procédures d'identification des sols

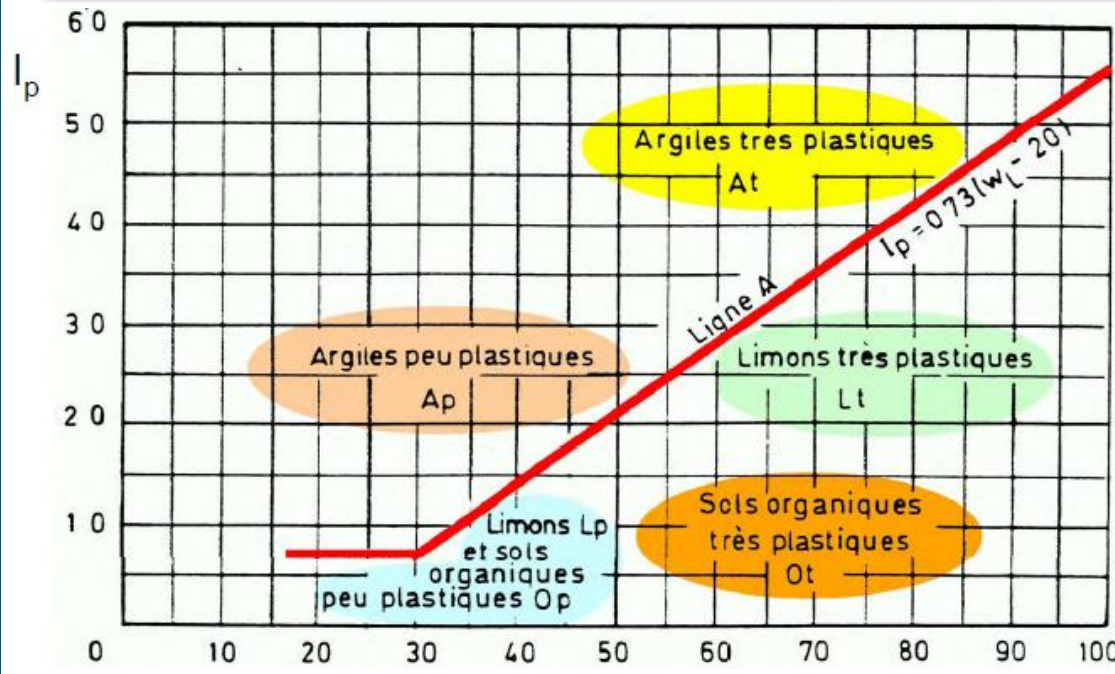
Principe

Sols à granulométrie  
uniforme

Sols à granulométrie non  
uniforme

Classification des sols fins (Plus de 50 % des éléments < 0,08 mm)

La classification LPC des sols fins utilise les résultats des essais de détermination des limites d'Atterberg. Cette classification est résumée par l'abaque suivant :



Argiles peu plastiques (Ap) ;  
Argiles très plastiques (At) ;  
Limon très plastique (Lt) ;  
Sols organiques très plastiques (Ot) ;  
Limon (Lp) et sols organiques peu plastiques (Op).

classification  
géotechnique  
des sols

La classification  
LCPC

Procédures  
d'identification  
des sols

Il s'agit de l'abaque de plasticité de Casagrande permettant de classer les sols fins en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité. La ligne A est définie par l'équation :  $I_p = 0.73(\omega_l - 20) \text{ [%]}$

## Principe

## Sols à granulométrie uniforme

## Sols à granulométrie non uniforme

### classification géotechnique des sols

### Classification des sols grenus (Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm)

Définitions			Symboles	Conditions	Désignation géotechnique
<b>Graves</b>	<b>Plus de 50 % des éléments &gt; 0,08 mm ont un diamètre (<math>D &gt; 2\text{mm}</math>)</b>	Moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	<b>Gb</b> (GW)	$Cu = D_{60} / D_{10} > 4$ $1 < Cc = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) < 3$	<b>Grave propre</b> <b>Bien graduée</b>
			<b>Gm</b> (Gp)	Une des conditions de Gb non satisfaire	<b>Grave propre</b> <b>Mal graduée</b>
		Plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	<b>GL</b> (GM)	Limite d'ATTERBERG au-dessous de A	<b>Grave limoneux</b>
			<b>GA</b> (GC)	Limite d'ATTERBERG au-dessus de A	<b>Grave argileux</b>

Lorsque  $5\% < \% \text{ d'éléments} < 0.08 \text{ mm} < 12\%$ : on utilise un double symbole:

Pour les graves : Gb - GL, Gb - GA, Gm - GL et Gm - GA

La notation entre parenthèses est celle de la classification USCS. Ex: GW = well graded gravels

### Procédures d'identification des sols



## Principe

## Sols à granulométrie uniforme

## Sols à granulométrie non uniforme

### classification géotechnique des sols

### Classification des sols grenus (Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm)

Définitions			Symboles	Conditions	Désignation géotechnique
<b>Sables</b>	<b>Plus de 50 % des éléments &gt; 0,08 mm ont un diamètre (<math>D &lt; 2\text{mm}</math>)</b>	<b>Moins de 5 % d'éléments &lt; 0,08 mm</b>	<b>Sb</b> (SW)	$Cu = D_{60} / D_{10} > 6$ $1 < Cc = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) < 3$	<b>Sable propre</b> <b>Bien graduée</b>
			<b>Sm</b> (Sp)	Une des conditions de Sb non satisfaites	<b>Sable propre</b> <b>Mal graduée</b>
		<b>Plus de 12 % d'éléments &lt; 0,08 mm</b>	<b>SL</b> (SM)	Limite d'ATTERBERG au-dessous de A	<b>Sable limoneux</b>
			<b>SA</b> (SC)	Limite d'ATTERBERG au-dessus de A	<b>Sable argileux</b>

Lorsque  $5\% < \% \text{ d'éléments} < 0,08 \text{ mm} < 12\%$ : on utilise un double symbole:

Pour les sables : Sb - SL, Sb - SA, Sm - SL et Sm - SA

La notation entre parenthèses est celle de la classification USCS. Ex: GW = well graded gravels

### Procédures d'identification des sols

Principe

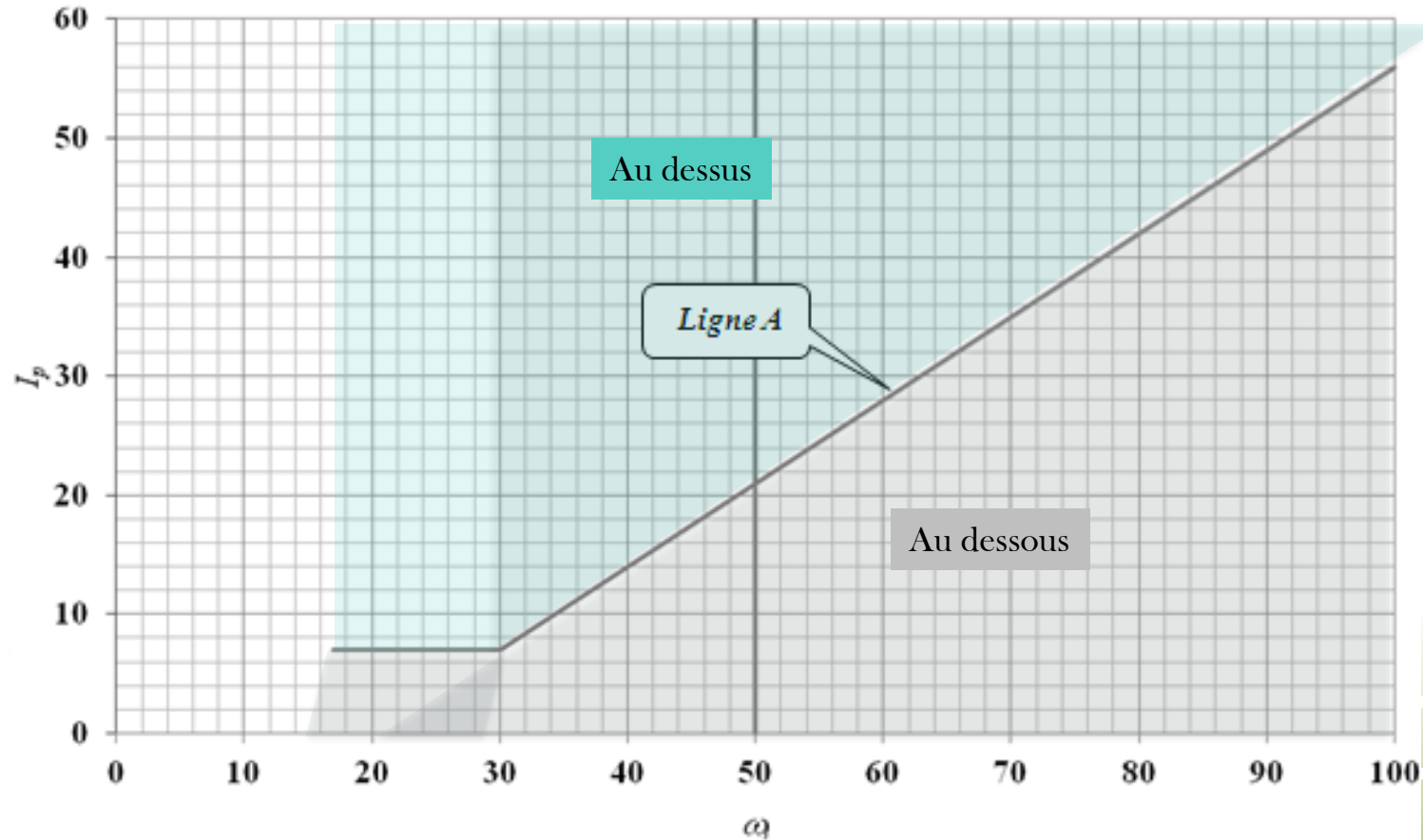
Sols à granulométrie  
uniforme

Sols à granulométrie non  
uniforme

classification  
géotechnique  
des sols

La classification  
LCPC

Procédures  
d'identification  
des sols



Abaque de plasticité de Casagrande

## Principe

## Sols à granulométrie uniforme

## Sols à granulométrie non uniforme

## classification géotechnique des sols

Classification des **sols organiques** (la teneur en matières organiques  $> 10\%$ )

- Lorsque les **grains** sont constitués de **matière organiques**, le sol est dit **organique**.
- Ce type des sols a des mauvaises propriétés géotechniques.

La classification des sols organiques est résumée dans le tableau suivant:

Teneur en matière organique (%)	Désignation géotechnique		
0 - 3	Sol inorganique		
3 - 10	Sol faiblement organique	fO	Vase
10 - 30	Sol moyenne organique	mO	Sol tourbeux
> 30	Sol très organique	tO	Tourbe

## La classification LCPC

## Procédures d'identification des sols



## Principe

## Sols à granulométrie uniforme

## Sols à granulométrie non uniforme

classification  
géotechnique  
des sols

### Exercice d'application 5:

#### ❖ Exercice (1):

- (1) La classification LPC des sols exploitent les résultats de deux essais d'identification. Lesquels ?
- (2) La méthode LPC classe les sols en combien de types ?

#### ❖ Exercice (2):

Déterminer la classification LPC des sols suivants :

Sol	% < 80 $\mu\text{m}$	% < 2 mm	$d_{10}$ [mm]	$d_{30}$ [mm]	$d_{60}$ [mm]	$\omega_p$ [%]	$\omega_l$ [%]
Sol (1)	4	12	1,7	3	10,5	--	--
Sol (2)	14	52	--	--	--	20	37
Sol (3)	3	58	0,7	1	3	--	--
Sol (4)	23	63	--	--	--	16	32
Sol (5)	6	11	2	3	10	19	37
Sol (6)	7	59	1	1,2	3	16	32

Justifier vos réponses !

La classification  
LCPC

Procédures  
d'identification  
des sols

## Résumé

**La procédure de l'identification** se fait comme suit :

- On commencera toujours par une observation préalable de l'échantillon : (couleur, odeur, homogénéité, présence de coquilles, de débris végétaux, etc...).
- On passera ensuite à la mesure des paramètres physiques :  $\gamma_s$  (au pycnomètre), teneur en eau  $w$ , indice des vides  $e$  (par mesure directe ou à l'aide d'une balance hydrostatique). On pourra en déduire les autres caractéristiques physiques.
- On procédera ensuite à la détermination de la granulométrie : Par tamisage à sec s'il (n'y a pas d'éléments fins) : Par voie humide (tamisage sous l'eau) dans le cas contraire.
- On comptera l'essai par la sédimentométrie sur la fraction  $< 100 \mu m$ . En précisant bien le mode de dispersion et la nature du floculant.

On en tirera :

➔ Le coefficient d'uniformité de HAZEN :  $C_u = d_{60} / d_{10}$  Eventuellement le coefficient de courbure :  $C_c = (d_{30})^2 / (d_{10} \times d_{60})$ . Le diamètre efficace  $d_{10}$ .

➔ Le pourcentage des éléments inférieurs à  $2 \mu m$  (teneur en argile) par rapport au poids total du mortier (éléments  $< 0.40 mm$ ).

➔ On terminera en déterminant sur le mortier les limites de liquidité et de plasticité, d'où l'on déduira  $IP$ , et on reportera le résultat sur l'abaque de plasticité de CASAGRANDE. On pourra également en déduire l'activité du mortier.

➔ Essai d'équivalent de sable particulièrement utilisé en géotechnique routière : On a donc théoriquement :

$ES = 0$  argile pure -  $ES = 20$  sol plastique

$ES = 40$  sol non plastique -  $ES = 100$  sable pur et propre

En pratique, cet essai n'est réalisé que sur des sols grenus pour lesquels la détermination des limites d'ATTERBERG est difficile et imprécise. On a donc en général :  $ES > 30$ .

**classification  
géotechnique  
des sols**

**La classification  
LCPC**

**Procédures  
d'identification  
des sols**

**Fin**