

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS

1. - IDENTIFICATION et CLASSIFICATION

Les sols naturels sont constitués par un mélange de particules élémentaires de différentes dimensions et par suite de propriétés différentes. D'une manière générale, les propriétés d'un sol dépendront de la proportion de fines particules par rapport à la quantité des plus grosses. Pour étudier les propriétés mécaniques des sols, il est donc nécessaire d'en connaître la nature et de les classer. Pour ce faire on se référera aux classifications mises au point, qui repose sur deux essais principaux d'identification : l'analyse granulométrique et la détermination des limites d'Atterberg.

1.1. - Analyse granulométrique et sédimentométrie

Cet essai consiste à déterminer la répartition en poids des grains du sol suivant leur dimension. Pour les particules de dimensions supérieures à $80 \mu\text{m}$, la séparation se fait par tamisage. Pour les fines ($< 80 \mu\text{m}$), on doit pratiquer l'essai de sédimentométrie.

- *Tamisage*

Celui-ci peut se faire à sec ou sous l'eau à l'aide de tamis ou de passoires en progression géométrique de raison $\sqrt[10]{10}$. Les résultats de l'analyse sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique où l'on porte les diamètres des particules en abscisse (graduation log) et les pourcentages en poids des tamisats cumulés en ordonnée. Sur la courbe on appellera D_x le diamètre pour lequel le tamisât cumulé est de $x\%$. A l'aide de cette courbe on détermine ainsi pour chaque diamètre D_x la quantité de particules inférieures en dimension à D_x .

- *Sédimentologie*

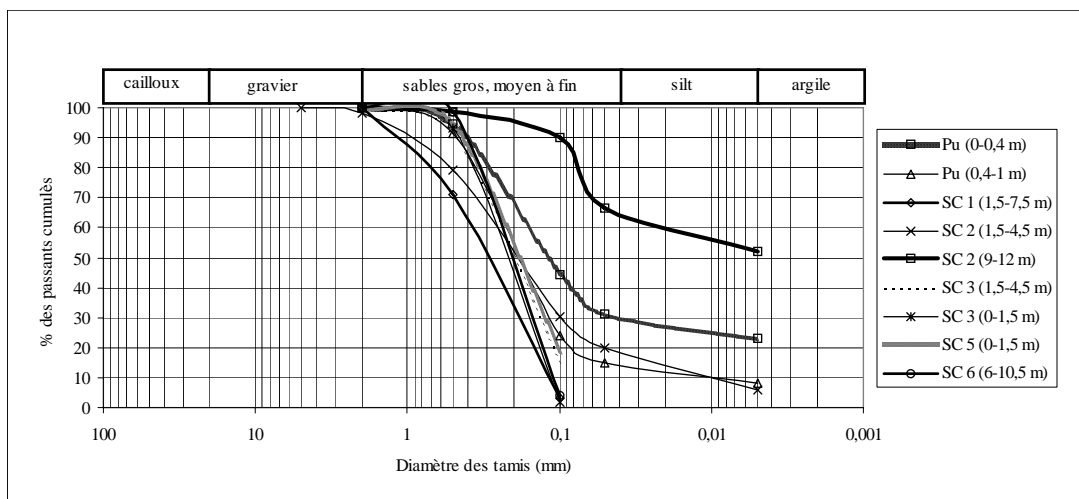
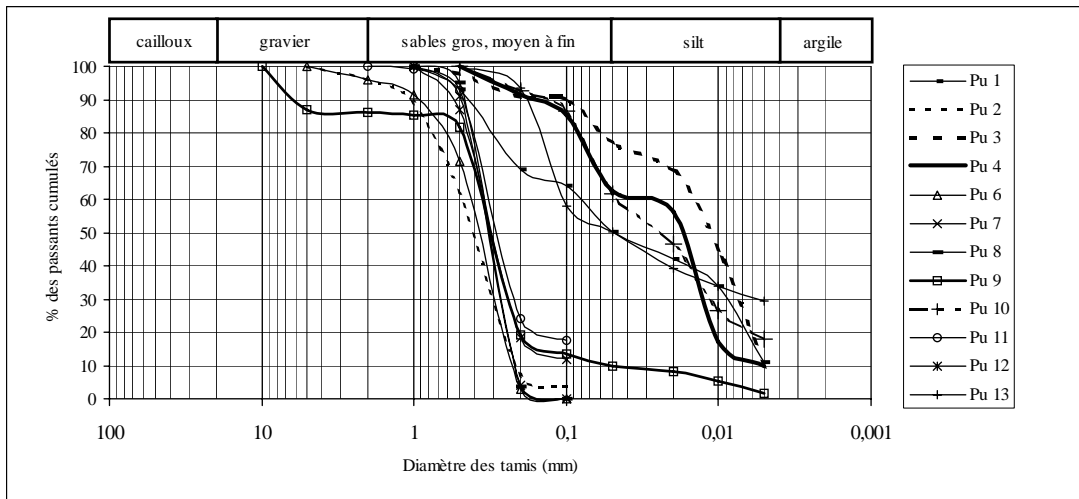
Cet essai est basé sur la loi de Stokes qui donne la vitesse limite V d'une particule de poids spécifique ρ_s tombant sous l'action de la pesanteur, dans un liquide visqueux de poids spécifique ρ_w et de viscosité η . En réalité cet essai se fait en dispersant les particules de sol dans l'eau par agitation. On laisse décanter, et on mesure la densité de la solution à différents niveaux et en fonction du temps. En établissant une relation entre le diamètre des particules et le temps d'une part, la densité et le % de particules d'autre part, on peut ainsi tracer la courbe sédimentométrique qui complète la courbe granulométrique.

On détermine alors les caractéristiques du sol par 2 coefficients :

- le coefficient d'uniformité (coefficient de Hazen) : C_u ($C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$) qui caractérise l'étalement de la granulométrie,

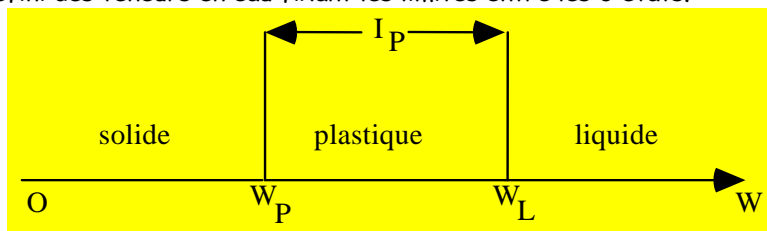
- le coefficient de courbure : C_c ($C_c = \frac{(D_{60})^2}{D_{10} \times D_{30}}$)

Suivant la forme granulométrique et la valeur des 2 coefficients, on dira que la granulométrie est étalée ou serrée, continue ou discontinue, bien graduée ou mal graduée.



1.2.- Limites d'Atterberg

Cet essai se pratique sur la fraction de sol dont les particules ont une dimension inférieure à 0,42 mm (le mortier). Si à un échantillon de sol préalablement desséché et pulvérisé, on fait croître la teneur en eau de façon homogène par malaxage, il passe progressivement de l'état solide, à l'état plastique puis à l'état liquide. Par définition, la teneur en eau w d'un sol est le rapport entre le poids d'eau W_w et le poids de sol sec W_s . Elle est exprimée en %. En 1905, Atterberg a défini des teneurs en eau fixant les limites entre les 3 états.



Ces limites ne représentent pas un état physique précis. Elles ont un caractère conventionnel et sont définies à partir d'essais normalisés.

- La limite de liquidité W_L

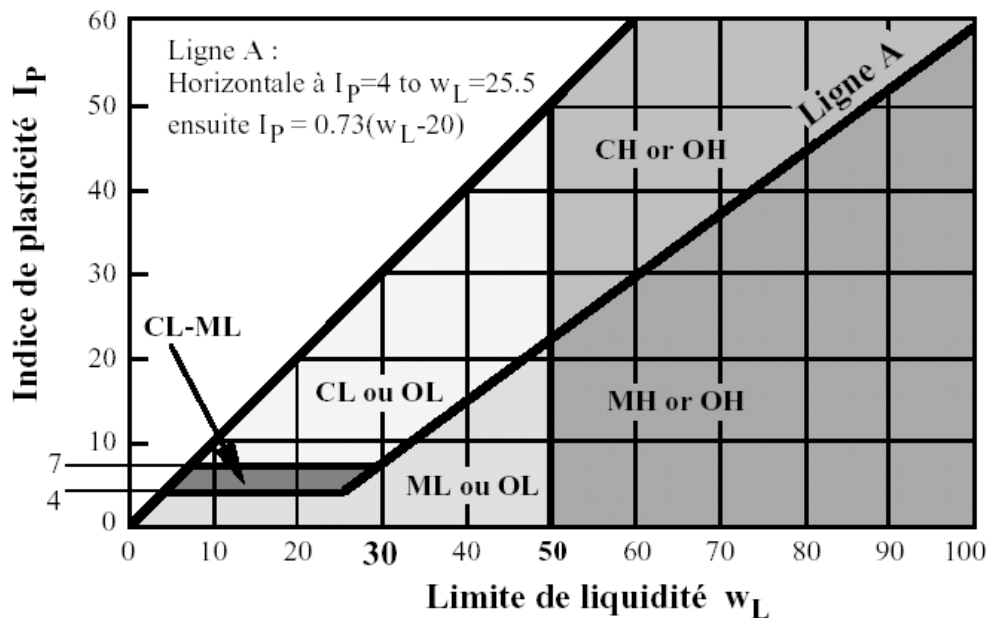
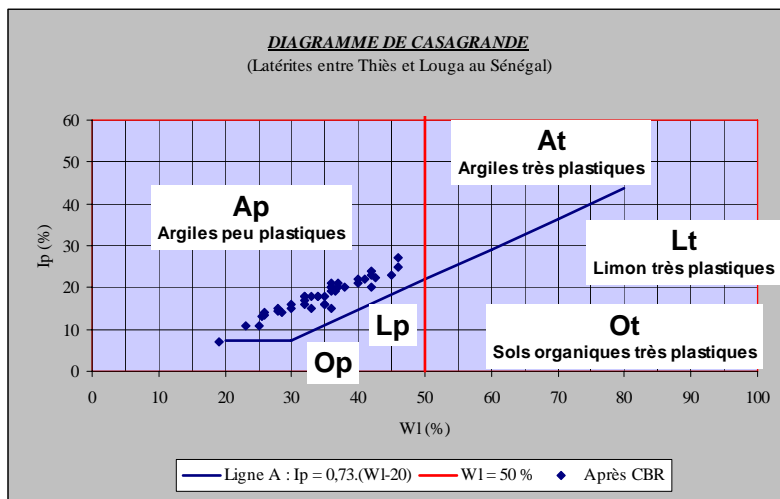
Le mortier est placé dans une coupelle et est séparé en 2 parties par une rainure. Des coups secs sont imprimés à la coupelle avec un appareillage spécial. Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau pour laquelle les deux lèvres de la saignée se rejoignent sur une longueur supérieure à 1 cm pour un nombre de coups donnés à la coupelle égale à 25.

- La limite de Plasticité W_p

C'est la teneur en eau au-dessous de laquelle il n'est plus possible de confectionner des boudins de sol de 3 mm de \varnothing sans qu'ils se rompent ou s'émiettent.

- L'indice de plasticité I_p

Il donne l'étendue du domaine plastique $I_p = W_L - W_p$. La plasticité d'un sol (c'est-à-dire sa faculté de devenir très déformable en absorbant de l'eau) est appréciée par le couple (W_L , I_p) qui dépendent de la nature des minéraux argileux contenus dans le sol et de leur quantité. C'est ainsi que Casagrande a défini un diagramme dit "Abaque de plasticité de Casagrande" qui permet de classer les sols fins.



- On définit aussi l'indice de consistance d'un sol $I_c = \frac{W_i - w}{W_i - W_p}$ (le sol étant pris dans son état naturel teneur en eau w) et l'indice de liquidité $I_l = \frac{w - W_p}{W_i - W_p}$.

1.3. - Activité - Sensibilité - Thixotropie des argiles

- teneur en argile

Par définition, la teneur en argile (exprimée en %) est égale à :

$$\% \text{ Argile} = \frac{\text{Poids de sol sec } < 2 \mu\text{m}}{\text{Poids de sol sec } < 0,42 \text{ mm}} \times 100$$

L'activité d'une argile est alors définie par : $A (\%) = \frac{I_p}{\% \text{ Argile}}$

$A < 0,75$: argiles inactives

$0,75 < A < 1,25$ argiles normales

$A > 1,25$ argiles actives

- Sensibilité

Par définition S_T est le rapport de la résistance à la compression simple avant remaniement sur la résistance à la compression simple après remaniement. On effectue ces essais de compression sur des cylindres de sol dont la hauteur h est égale à 2ϕ (diamètre de la carotte).

$2 < S_T < 4$: argile normale

$4 < S_T < 8$: argile sensible

$S_T > 8$: argile très sensible

- Thixotropie des boues argileuses

Certaines boues argileuses (bentonites) à grains fins du type Montmorillonites, ont la propriété de passer quasiment directement de l'état liquide lorsqu'elles sont agitées à l'état solide. Ces bentonites sont utilisées en particulier pour les forages dans le sable car avec le sable il se forme un voile solide sur les parois du trou, ce voile solide (cake) étant parfaitement imperméable tandis que le centre du trou reste mou.

2. - CLASSIFICATION DES SOLS

Les différentes classifications des sols reposent en général sur la classification américaine USCS (Unified Soils Classification System) dont les bases sont :

- le pourcentage d'éléments gros et fins ($< 80 \mu\text{m}$)
- la forme de la courbe granulométrique,
- les limites W_L et W_p ainsi que l'indice I_p .

On commence d'abord par déterminer les pourcentages :

- sol grenus : plus de 50% des éléments sont $>$ à $80 \mu\text{m}$.
- sols fins : plus de 50% des éléments sont $<$ à $80 \mu\text{m}$.

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 > 2 mm	Moins de 5 % des éléments sont < 0,08 mm	Gb (GW)	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $1 < Cu = \frac{(D_{60})^2}{D_{10} \times D_{60}} < 3$	Grave propre bien graduée
			Gm (GP)	Une des conditions de Gb non satisfaite	Grave propre mal graduée
		Plus de 12 % des éléments sont < 0,08 mm	GL (GM)	Limites d'Atterberg au-dessous de A (*)	Grave limoneuse
			GA (GC)	Limites d'Atterberg au-dessus de A (*)	Grave argileuse
SABLES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	Moins de 5 % des éléments sont < 0,08 mm	Sb (SW)	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $1 < C_c < 3$	Sable propre bien gradué
			Sm (SP)	Une des conditions de Sb non satisfaite	Sable propre mal gradué
		Plus de 12 % des éléments sont < 0,08 mm	SL (SM)	Limites d'Atterberg au-dessous de A (*)	Sable limoneux
			SA (SC)	Limites d'Atterberg au-dessus de A (*)	Sable argileux
<p><u>Remarque</u> : Si le pourcentage d'éléments inférieurs à 0,08 mm est compris entre 5% et 12%, on utilise un double symbole. Pour (*) se reporter à l'abaque de Casagrande.</p>					

En laboratoire, la classification commence par une appréciation visuelle des sols de manière à distinguer d'une part, les sols très organiques, d'autre part les sols grenus ou fins. Dans les cas limites, on devra déterminer le pourcentage d'éléments inférieurs à 80. Les sols organiques se reconnaissent par leur texture fibreuse due à une décomposition de matière végétale, leur couleur tirant sur l'ocre, le rouge, ou le brun. Mais celle-ci n'est pas déterminante surtout en Afrique où les sols latéritiques présentent les mêmes couleurs. Par contre l'odeur caractéristique de pourriture ou de gaz issus de la décomposition est un atout déterminant.

Pour la lecture des tableaux de classification, les symboles utilisés ont la signification suivante :

a) Éléments du sol :

- * G : grave. Le gravier en est la fraction principale.
- * S : sable.
- * L : limon ou sols limoneux.
- * A : argile ou sols argileux.
- * T : tourbe.
- * O : sols organiques.

b) Granulométrie :

* b : bien gradué. Toutes les dimensions de grains sont représentées , aucune ne prédomine.

* m : mal gradué. Une (ou plusieurs) dimension de grains prédomine.

c) Plasticité du sol :

* t : très plastique (limite de liquidité élevée).

* p : peu plastique (limite de liquidité faible).

2.1.- Classification des sols grenus :

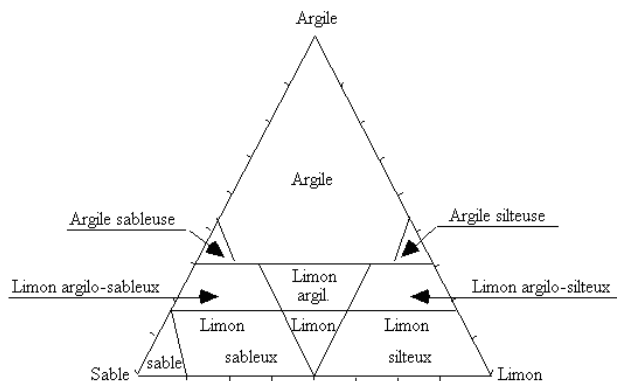
On se sert du tableau de classification général pour séparer les sols grenus des sols fins. (Tableau 1). Pour plus de précision, on utilise ensuite le tableau de classification des sols granus (Tableau 2).

2.2.- Classification des sols fins :

On utilise l'abaque de Casagrande qui permet de déterminer la plasticité du sol. Lorsque l'une des caractéristiques se situe à la limite séparant deux classes, on utilise un double symbole : par exemple, Ap - Lp.

2.3.- Autre classification :

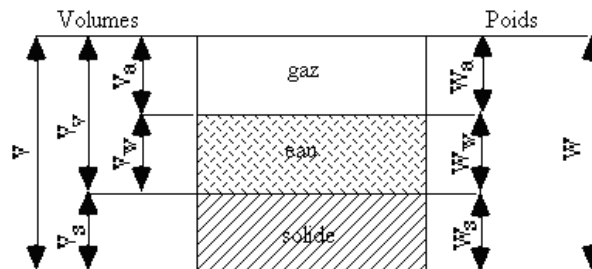
Une autre type de classification des sols fins a été mis au point par le "Public Road Administration", mais qui n'est pas applicable aux sables et graviers habituels. Dans un échantillon de sol donné, on admet qu'il y a en proportion variable du sable, du limon, et de l'argile. On utilise alors un diagramme triangulaire.



3 - PARAMETRES DEFINISSANT L'ETAT D'UN SOL

3.1.- Schéma poids-volume :

Les caractéristiques mécaniques d'un sol dépendent des quantités d'air, d'eau et de matière solide entrant dans sa composition.



Toutes les quantités sont déterminées par mesure de volume ou de poids avant et après étuvage à 105° C jusqu'à poids constant. Les paramètres définis sont tous des rapports entre deux ou plusieurs de ces quantités de base. Les relations entre ces paramètres sont donc indépendantes de la quantité de sol considéré et l'une des quantités élémentaires pourra, dans la recherche de ces relations, être prise égale à l'unité.

3.2.- Poids spécifiques

Par définition, nous aurons les relations suivantes :

- Poids spécifique du sol : $\gamma = \frac{W}{V}$
- Poids spécifique apparent sec : $\gamma_d = \frac{W_s}{V}$
- Poids spécifique des grains : $\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$
- Poids spécifique du liquide (eau) : $\gamma_w = \frac{W_w}{V_w}$, généralement pris égal à 10 kPa
- On parlera aussi du poids spécifique du sol immergé (soumis à la poussée d'Archimède) appelé encore poids spécifique déjaugé : $\gamma' = \gamma - \gamma_w$

3.3.- Paramètres sans dimension

a) Teneur en eau : $W = \frac{W_w}{W_s}$

Les valeurs de teneur en eau sont très variables ; pour argiles, elles peuvent dépasser 100% ; mais pour celles-ci la mesure de teneur en eau est très incertaine. En effet, à la température de 105°C, seule l'eau interstitielle est éliminée. L'eau adsorbée ne l'est que partiellement et l'eau de constitution ne l'est pas du tout. Si dans les couches superficielles du sol, elle est de l'ordre de 10%, il n'en va pas de même dans les couches profondes où la teneur en eau varie peu. Par contre certains sols comme les tourbes ont des teneurs en eau pouvant aller jusqu'à 600% et plus.

b) Degré de saturation : $S_r = \frac{V_w}{V_s}$

Lorsque le sol est sec $S_r = 0$. Lorsqu'il est saturé, c'est-à-dire lorsque les vides du squelette solide sont remplis d'eau : $S_r = 1$.

c) Porosité et indice des vides :

La porosité est le rapport du volume des vides (c'est-à-dire du volume occupé par l'air, l'eau ou les deux fluides simultanément) au volume total du sol. Dans le volume unité, les grains solides occupent un volume de $C = 1 - n$, que l'on appelle la compacité, n étant la porosité définie ci-dessus. L'indice des vides fait double emploi avec la porosité mais son utilisation est parfois plus facile dans les problèmes. C'est le rapport du volume des vides au volume des grains solides ;

avec $n = \frac{V_v}{V}$ et $e = \frac{V_v}{V_s}$