

Chapitre 2

IDENTIFICATION DES SOLS

1. INTRODUCTION

Quelque soit l'utilisation envisagée d'un sol, il est important de connaître sa nature, sa composition et la répartition des grains de différentes tailles qui le compose. Les essais qui conduisent à cette étude portent le nom d'ESSAIS D'IDENTIFICATION.

L'objet de ce chapitre est d'introduire les paramètres d'état et d'identification menant à la classification géotechnique des sols.

En particulier les paramètres d'état (caractéristiques physiques du sol) serviront par la suite à expliquer le compactage des sols et à décrire leurs comportements hydrauliques et mécanique. Ces paramètres permettront également d'expliquer des phénomènes tels que le tassement et la consolidation.

1. CLASSIFICATION DES SOLS

1.1 Classification par la taille des grains solides d'un sol

Ils sont surtout définis granulométriquement. En considérant le diamètre moyen D des grains, on distingue grossièrement :

- les blocs rocheux	$D > 200\text{mm}$
- les cailloux	$20\text{mm} < D < 200\text{mm}$
- les graviers	$2\text{mm} < D < 20\text{mm}$
- les sables grossiers	$0,2\text{mm} < D < 2\text{mm}$
- les sables fins	$20\ \mu\text{m} < D < 0,2\text{mm}$
- les silts ou limons	$2\ \mu\text{m} < D < 20\ \mu\text{m}$
- les argiles	$D < 2\ \mu\text{m}$

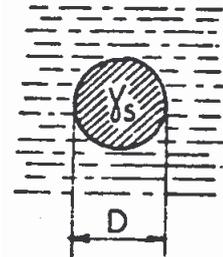


Tableau 2.1 : Définition des classes de dimensions en granulométrie

A noter : Les dimensions extrêmes varient légèrement suivant le système de classification (en particulier les Pédologues n'utilisent pas les mêmes dimensions !)

1.2. Classification par le comportement des sols

1.2.1. Comportement des sols pulvérulents (ou encore grenu : $D > 20\ \mu$)

Les sols pulvérulents : sable, gravier, cailloux, blocs sont constitués essentiellement de la silice (quartz), du calcaire et d'autres roches inertes. Les effets capillaires dus à l'eau sont négligeables ; Les grains se comportent comme les granulats inertes du béton.

1.2.2. Comportement des sols cohérents (ou encore sol fin : $D < 20\ \mu \Leftrightarrow 0,02\ \text{mm}$)

Bien que de dimension des grains du squelette ait une influence, le comportement d'un sol fin est avant tout fonction :

- De sa composition minéralogique,
- De sa teneur en eau,
- Et de sa structure, c'est-à-dire de la manière dont les particules sont disposées et orientées les unes par rapport aux autres.

En particulier la consistance d'un sol fin varie beaucoup suivant sa teneur en eau. Plus précisément, en opérant à teneur en eau décroissante, on rencontre les quatre états/comportements suivants :

a) Etat liquide :

Le sol n'a qu'une cohésion très faible. Il a l'aspect d'un fluide. Il tend à s'étaler si on le pose sur une surface horizontale.

b) Etat plastique :

Le sol a une cohésion plus importante. Posé sur une surface horizontale, il n'a pas tendance à s'étaler mais n'offre aucune résistance à l'action de charges même très faibles.

c) Etat solide avec retrait :

La déformabilité du corps est beaucoup plus faible. Soumis à la dessiccation, il perd une partie de son eau interstitielle tout en se contractant d'une valeur appréciable.

d) Etat solide sans retrait :

La rigidité du corps augmente encore et son volume ne change pas quand sa teneur en eau diminue.

Le passage d'un état à l'autre s'effectue évidemment d'une façon progressive.

1.2.3. Cas particulier des argiles

On définit les argiles comme des sols de diamètre moyen inférieures $2\mu\text{m}$. Il s'agit donc d'un sous groupe des sols fin.

Les argiles proviennent de l'altération chimique des roches et plus exactement des minéraux silicates (Feldspaths, mica...).

Le comportement mécanique d'une argile est fortement influencé par sa structure cristalline de base. Ces structure cristalline peuvent être tel qu'en présence d'eau elle augmente de volume (3 à 4 fois). On parle alors **d'argile active**.

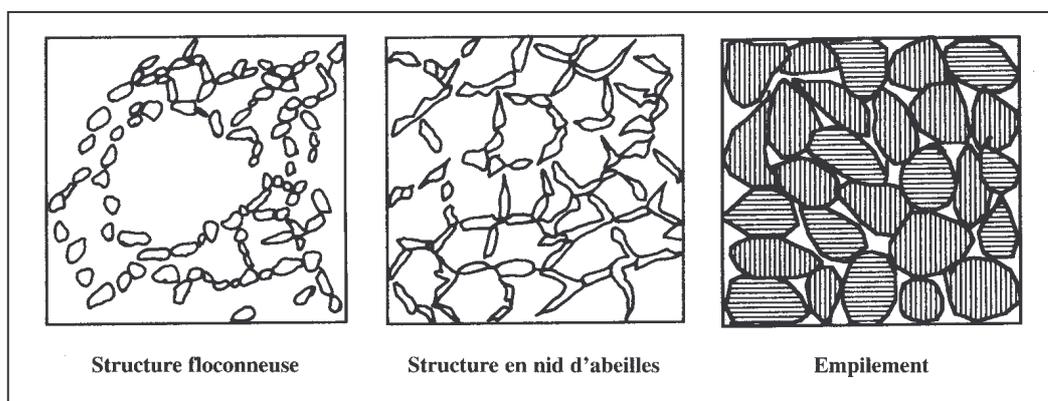


Fig. 2.1 : Différentes structures d'argiles d'après Terzaghi (d'après Fondations et ouvrages en terre)

Les types d'argiles les plus fréquents sont : la koalinite, la montmorillonite et l'illite. Ces différents types d'argiles se comportent différemment vis à vis de l'eau.

- **La koalinite** est stable au contact de l'eau.
- **La montmorillonite** n'est pas du tout stable au contact de l'eau. Les sols à forte teneur en montmorillonite sont susceptibles de gonflement et de retrait important.
- **L'illite** a un comportement intermédiaire (**les latérites font partie de cette famille d'argile**).

D'autres argiles peuvent être encore tixotropique. C'est le cas notamment des argiles situées sous la ville de Mexico. Ces argiles sous l'effet par exemple d'un tremblement de terre ou localement d'une machine tournante (mise en mouvement/vibration) deviennent alors liquide.

A noter : le constructeur de manière générale devra toujours se méfier des terrains argileux car se sont des terrains à même de causer de graves désordres sur les ouvrages (argile gonflante ou encore active).

2. PROPRIETES CARACTERISTIQUES DES SOLS

On a vu que le sol était un ensemble de trois phases : solide, liquide, gaz. Aussi est-il important de définir un certain nombre de caractéristiques physiques qui permettront de préciser l'importance de ces différentes phases par rapport à l'ensemble. Ces caractéristiques seront très utiles pour la description des échantillons remaniés et non remaniés ainsi que pour l'évaluation des contraintes au sein des massifs. Les caractéristiques granulométriques et l'état de consistance seront employés pour classer les sols dans le cadre de la classification géotechnique.

2.1 Caractéristiques physiques : définition, notation, ordres de grandeur.

2.1.1. Poids volumiques - Unité SI N/m³

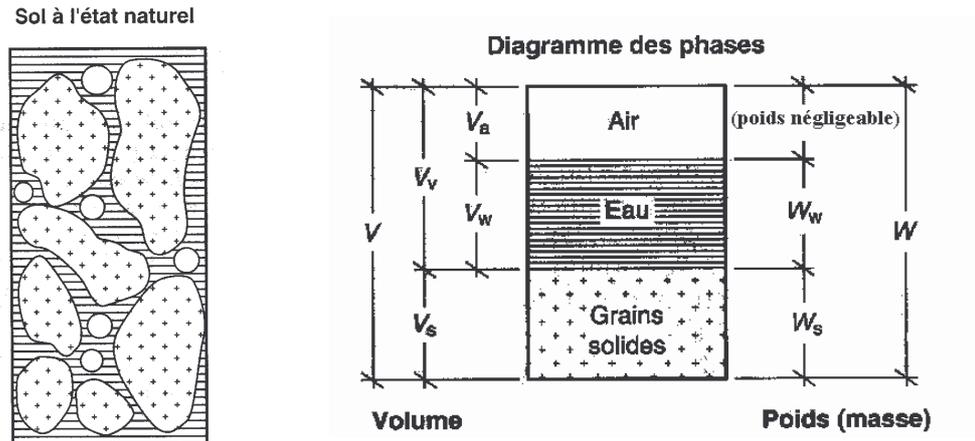


Fig 2.2 Schéma d'un volume élémentaire de sol : Poids et volumes des différentes phases

- 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 ;

- 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 $\gamma_w = 10^3 g = 9.81 KN / m^3 \approx 10 KN/m^3$

2.1.2 Densités

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

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

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

2.1.3. Porosité (n) - Indice des vides (e)

- Porosité (n)

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

$$n = \frac{V_a + V_w}{V} = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{V_s}{V} \quad \text{NB : } n \in [0 ; 1]$$

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

$$e = \frac{V_a + V_w}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} \quad \text{NB : } e \in [0,10 ; 5]$$

2.1.4 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

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

- Degré de saturation (notation S_r)

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

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

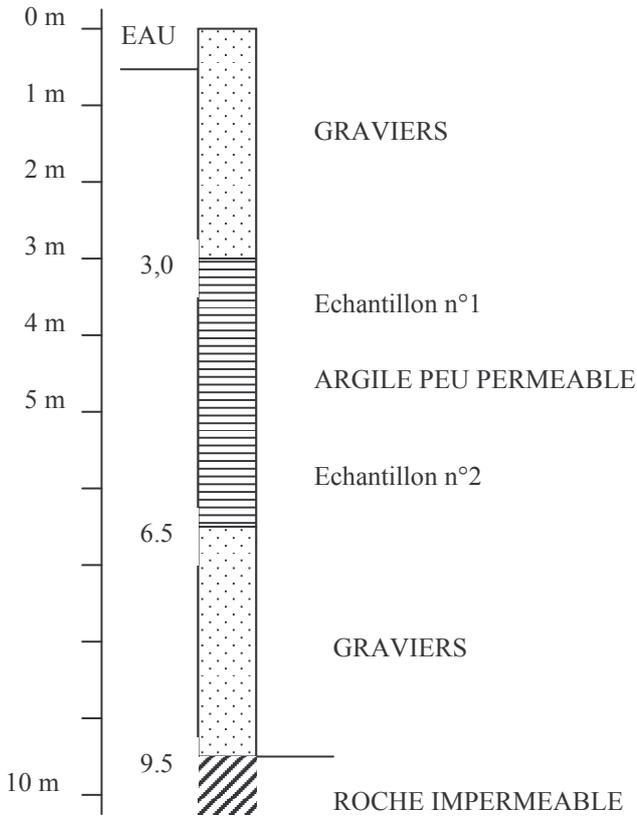
Sol sec $S_r = 0$; saturé $S_r = 1$; un sol est dit saturé lorsque le vide est entièrement occupé par l'eau

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

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

Exercice 2.1

On a réalisé un sondage de reconnaissance dont la coupe est donnée ci-dessous.



A l'arrivée des caisses de carottes au laboratoire, on a pris deux échantillons d'argile sur lesquels on a fait les mesures usuelles de poids et de volume.

	Échantillon n° 1	Échantillon n° 2
Poids total du sol	0,48 N	0,68 N
Volume total du sol	$3 \times 10^{-5} \text{ m}^3$	$4,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
Poids sec (après étuvage à 105°C)	0,30 N	0,40 N

Déterminer:

- le poids volumique γ et la teneur en eau w
- l'indice des vides, si l'on suppose que le poids volumique des particules solides γ_s , est égal à 27 kN/m^3 ;
- le degré de saturation S_r , dans la même hypothèse;

Réponses:

- $\gamma_1 = 16 \text{ kN/m}^3$; $\gamma_2 = 15,8 \text{ kN/m}^3$; $\omega_1 = 60 \%$; $\omega_2 = 70 \%$;
- $e_1 = 1,70$; $e_2 = 1,90$; c) $S_{r1} = 95 \%$; $S_{r2} = 99 \%$;

Exercice 2.2

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

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

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

Réponses:

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

Exercice 2.3

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

- a) son poids volumique sec γ_d
- b) son indice des vides e .

Réponses:

$$a) \gamma_d = 1/[1/\gamma_s + \omega/\gamma_w] \quad b) e = \omega \gamma_s/\gamma_w$$

Exercice 2.4

On connaît pour un sol

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

Calculer :

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

Réponses :

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

Exercice 2.5

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

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

Réponses:

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

2.1.5. Relations entre ces grandeurs

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

2.1.6. Poids volumique déjaugé (notation γ')

Il caractérise un sol plongé dans une nappe d'eau et par conséquent soumis à la poussée d'Archimède :

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = (\gamma_s - \gamma_w)(1 - n)$$

On a également la relation :

$$\gamma' = \gamma_d \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)$$

A noter : On ne parlera de poids volumique déjaugé que dans un milieu saturé.

2.1.7 Quelques ordres de grandeurs

Avant propos – ce qu'il faut retenir

Parmi tous les paramètres définis précédemment, les paramètres sans dimension sont incontestablement les plus importants. Ils définissent en effet l'état du sol, c'est-à-dire l'état de compressibilité (lâche ou serré) dans lequel se trouve le squelette ainsi que les quantités d'eau et d'air que contient le sol.

Comme nous le verrons dans les chapitres suivants, un sol grenu a un comportement qui dépend presque uniquement de son état de compacité lâche ou serré (sol grenu => *valeur de e* ?) alors qu'un sol fin a un comportement qui est avant tout fonction de sa teneur en eau (sol fin => *valeur de ω* ?)

a) *Densité des particules de la phase solide (grains)*

Les sols se composent en général d'oxydes dont la silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3) sont les constituants essentiels (plus de 70%).

Les éléments Si et Al ayant des masses atomiques voisines, le poids volumique des grains solides varie donc dans des limites assez faibles :

$$25,5 \text{ KN/m}^3 < \gamma_s < 28,5 \text{ KN/m}^3$$

Le tableau ci-dessous indique quelques valeurs de la densité des grains G de quelques minéraux constituant les sols.

A noter :

En première approximation on pourra souvent prendre la valeur $G \approx 2,65$
($\gamma_s \approx 26,5 \text{ KN/m}^3$)

Quartz	2,66
K-Feldpath	2,54 - 2,57
$\text{N}_a\text{-C}_a\text{-Feldpath}$	2,62 - 2,76
Calcite	2,72
Dolomite	2,85
Muscovite	2,7-3,1
Chlorite	2,6-2,9
Kaolinite	2,61 a
	2,64
Illite	2,84 .a
Montmorillonite	2,74 .a
	2.75-2,78
Attapulgite	2,30
a = valeur calculée à partir de la structure cristalline	

Tab. 2.3 (réf. WITHMAN et LAMBE)

b) Caractéristique des sols pulvérulents (grenus) en place

	n (%)	e	ω_{sat} (%)	$\frac{\gamma_d}{\gamma_w}$	$\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w}$
Sable homogène (granulométrie serrée)					
- peu compacte	46	0,85	32	1,43	1,89
- compacte	34	0,51	19	1,75	2,09
Sable à granulométrie étalée					
- peu compacte	40	0,67	25	1,59	1,99
- compacte	30	0,45	16	1,86	2,16

Tab 2.4 (réf. TERZAGHI et PECK)

A noter : Les valeurs de densité ci-dessous ont été calculées en prenant pour densité des grains $G = 2,65$

c) Poids volumique, indice des vides et porosité de certains sols

Type de sol	Poids volumiques (kN / m^3)			Indice des vides e		Porosité % n	
	$\gamma_{d \max}$	$\gamma_{d \min}$	γ_{\max}	e_{\max}	e_{\min}	n_{\max}	n_{\min}
Gravier	23	15	24,3	0,77	0,15	44	13
Grave limoneuse	22	17	23,6	0,57	0,20	36	17
Grave argileuse	21,5	17	23,4	0,57	0,24	36	19
Sable	22	15	23,7	0,77	0,20	44	17
Sable limoneux	20	14	22,5	0,91	0,34	48	25
Sable argileux	20	14	22,5	0,91	0,34	48	25
Limon inorganique	19,5	13	22,1	1,04	0,34	51	26
Limon organique	17	6,5	20,9	3,00	0,55	75	35
Argile inorganique	19	8	22,9	2,38	0,42	70	30
Argile organique	16	5	20	4,40	0,70	81	41

Tableau 2.5 : Poids volumique, indice des vides et porosité de certains sols (d'après Hough (1957), Hansbo (1975))

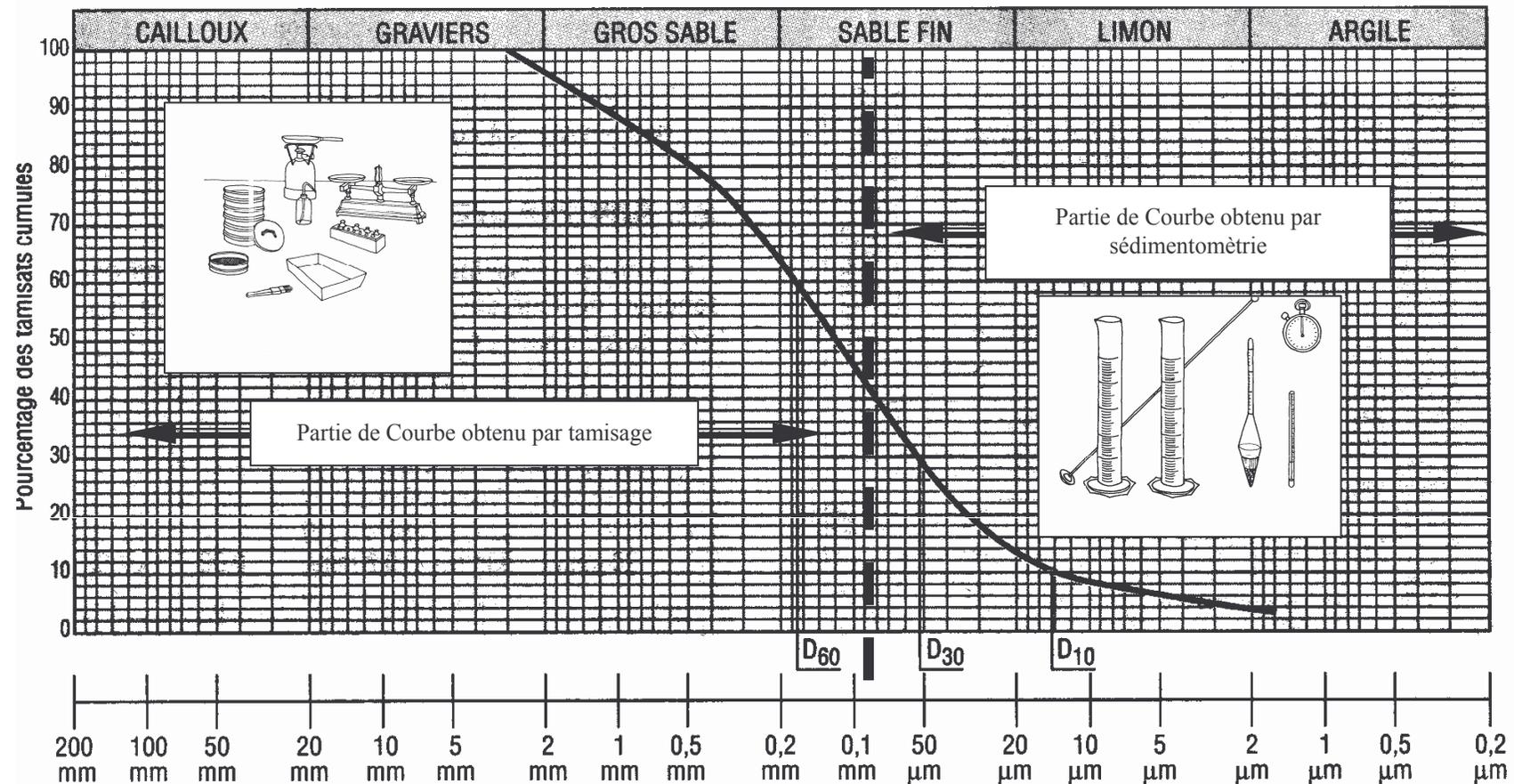
2.2 Identification des sols par Courbe granulométrique (NF P 94-056 & -057)

2.2.1 Analyse granulométrique et sédimentométrie

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol. Elle s'effectue :

- Par tamisage (tamis à maille carrée) pour les grains de diamètre supérieur à 80 μ ,
- Par sédimentométrie pour les grains plus fins. l'essai consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente conformément à la loi de Navier Stokes sur la vitesse de chute de billes sphériques dans l'eau. La mesure de la densité de suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion des grains de chaque diamètre.

Un mode de représentation commode des résultats de l'analyse granulométrique est la COURBE GRANULOMETRIQUE. Elle représente pour chaque dimension « d_y » de particule, le poids (ou masse) « y » des particules de cette taille ou de tailles inférieures. Ce poids est exprimé en pourcentage par rapport au poids total de la matière sèche de l'échantillon étudié. Cette courbe est tracée en coordonnées semi-logarithmique.



ANALYSE GRANULOMETRIQUE

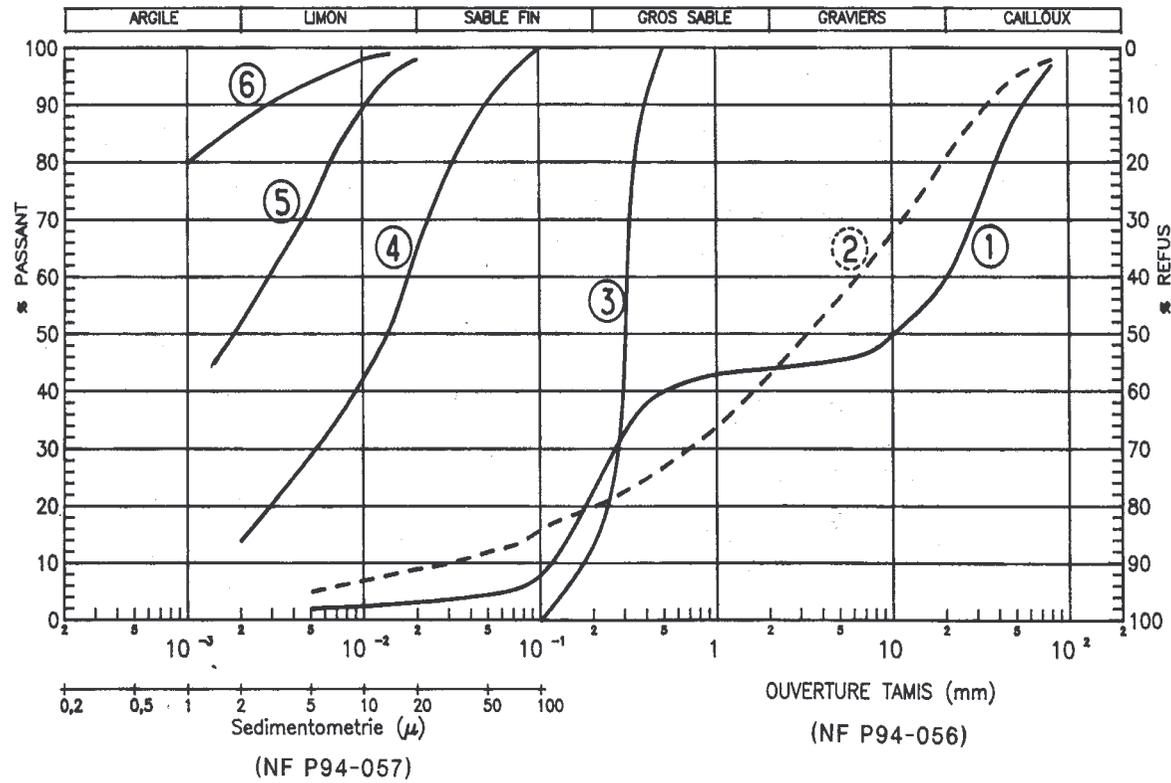


Fig 2.3.b Exemples de courbes granulométriques

2.2.2 Coefficient d'uniformité et coefficient de courbure d'une courbe granulométrique

La forme de la courbe granulométrique permet de préciser le degré d'étalement de la granulométrie ou encore son uniformité ; Cette uniformité est exprimée par le **Coefficient d'uniformité** ou COEFFICIENT DE HAZEN c_u défini par le rapport

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

d_y : dimension du tamis correspondant à $y\%$ de passants.

Ce coefficient est donc immédiatement calculé à partir de la courbe granulométrique.

- si $c_u < 2$, la granulométrie est uniforme (ou serrée),
- si $c_u > 2$, la granulométrie est étalée (ou variée).

On définit également le **coefficient de courbure** :

$$c_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad \text{A noter : Un sol est bien gradué si } c_c \text{ est compris entre 1 et 3}$$

Exercice : Calculer C_u et C_c du sol représenté page 19

2.3. Identifications propres aux sols fins

2.3.1. Etats de consistance - Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'ATTERBERG sont déterminées uniquement pour les éléments fins d'un sol (fraction passant au tamis de 0,4 mm), car se sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance du sol. L'essai consiste donc à faire varier la teneur en eau de cette fraction de sol et en observer sa consistance.

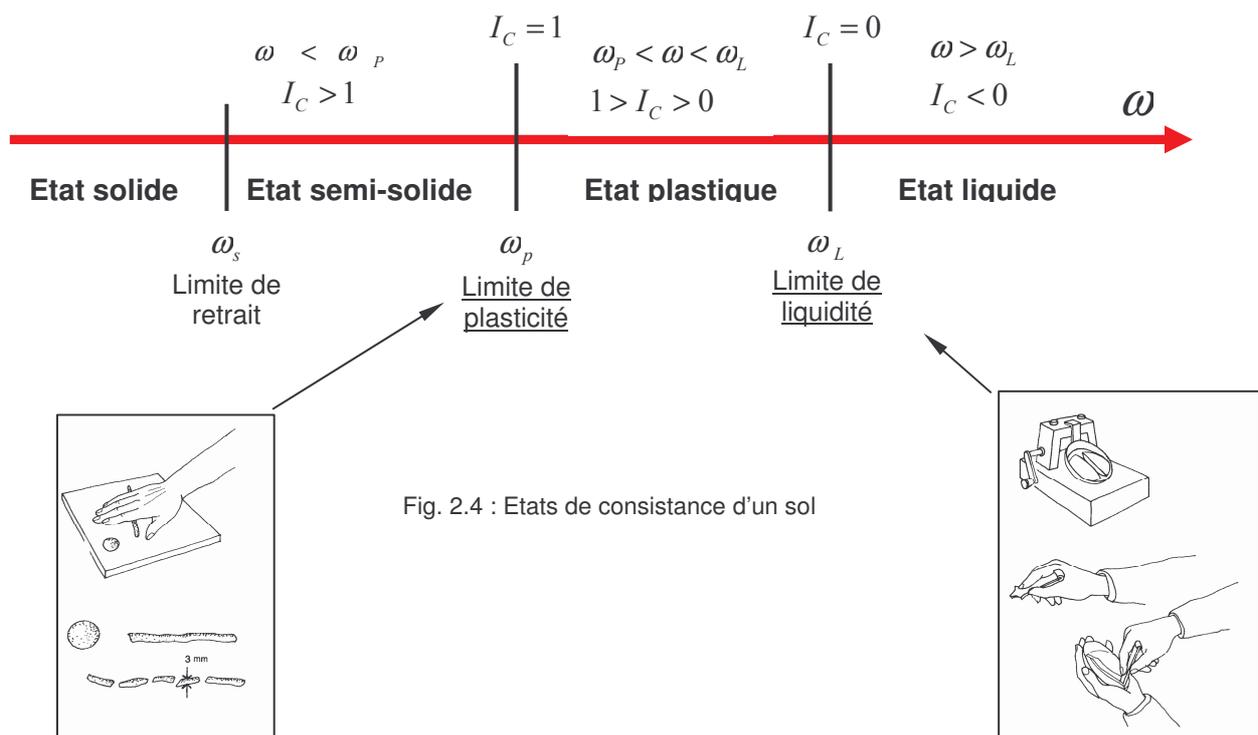


Fig. 2.4 : Etats de consistance d'un sol

Selon la teneur en eau, le sol se comportera comme un solide, un matériau plastique (capable de se déformer beaucoup sans casser) ou un liquide. On détermine plus particulièrement les valeurs suivantes :

- La limite de plasticité (ω_p)
- la limite de liquidité (ω_L)

La limite de plasticité (ω_p) est définie 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. Cette limite sépare l'état plastique de l'état semi-solide. En générale elle ne dépasse pas 40%.

La limite de liquidité (ω_L) est la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique.

Ces limites sont désignées sous le nom de limites d'ATTERBERG. Il existe en fait 5 limites d'ATTERBERG. Les deux ici mentionnées sont les principales et les trois autres, quoique intéressantes, sont peu utilisées.

La connaissance de ces limites est importante pour l'exécution de travaux de terrassements (fouille, tranchée, ...). En particulier, si le matériau doit être utilisé après remaniement (remblais, barrage en terre, ...), leur détermination revêt une importance considérable.

2.3.2. Indices de plasticité et de Consistance

- l'indice de plasticité I_p : C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. L'indice de plasticité mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc par la relation :

$$I_p = \omega_L - \omega_p$$

L'indice de plasticité caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique.

Indice de plasticité I_p	Etat- du sol
0 - 5	Non plastique
5 - 15	Peu plastique
15 - 40	Plastique
> 40	Très plastique

Tableau 2.6 Classification de l'argilité d'un sol selon l'indice de plasticité I_p

Un sol, dont l'indice I_p est grand, est très sensible aux conditions atmosphériques, car plus I_p est grand plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants.

I_p précise donc aussi les risques de déformation du matériaux.

- *Indice de consistance I_c*
La comparaison de la teneur en eau naturelle ω d'un sol et des limites D'ATTERBERG permet de se faire une idée de l'état d'une argile qu'on peut caractérisé par son indice de consistance :

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

Indice de consistance I_c	Etat- du sol
$I_c > 1$	Solide
$0 < I_c < 1$	Plastique
$I_c < 0$	Liquide

Tableau 2.7 : Etat du sol en fonction de l'indice de consistance

L'indice de consistance croît en même temps que la consistance du sol. A partir de 1, le sol peut être éventuellement réutilisé en remblai (on peut travailler).

Minéraux argileux	Ions métalliques	ω_p Limite de plasticité (%)	ω_L Limite de liquidité (%)	Indice de plasticité I_p
Kaolinite	Na	32	53	21
	K	29	49	20
	Ca	27	38	11
	Mg	31	54	23
	Fe	37	59	22
Montmorillonite	Na	54	710	656
	K	98	660	562
	Ca	81	510	429
	Mg	60	410	350
	Fe	75	290	215
Illite	Na	53	120	67
	K	60	120	60
	Ca	45	100	55
	Mg	46	95	49
	Fe	49	110	61
Argile d'Orly (France)	-	32	18	14
Argile de Londres	-	80	30	50
Argile de Mexico	-	500	375	125

Tableau 2.8 : Limites d'Atterberg et indice de plasticité de certains minéraux argileux (d'après Cornell, 1951)

2.3.3. Valeur au bleu de méthylène (NF P 94-068)

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 absorbée par les surfaces des particules de sols.

Le résultat VBS s'exprime donc en grammes de bleu pour 100g de sol.

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

Il est effectué sur la fraction 0/2 mm du sol et on distingue les valeurs suivantes :

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

2.4. Identifications propres aux sols grenus.

2.4.1 Essai d'équivalent de sable (NF P 18-598)

L'essai d'équivalent de sable permet de déterminer dans un sol la proportion relative de sol fin et de sol grenu. Cet essai est important, car la présence d'éléments fins peut modifier le comportement de ces sols. En particulier la présence de particules argileuses dans le sable d'un mortier ou béton, en abaissant l'adhérence « pâte de ciment/granulats », est défavorable à la mise en œuvre et aux performances finales du béton ou mortier (micro-fissuration).

Il est effectué sur les éléments de dimensions inférieures à 5 mm (fraction 0/5 mm du sol).

A noter : Le paramètre équivalent de sable, retenu dans la classification des sols de 1976 pour distinguer les sols peu à très peu argileux, perd beaucoup de son intérêt depuis l'introduction de la VBS. En d'autres termes, en géotechnique cet essai n'est pratiquement plus utilisé. L'intérêt de l'équivalent de sable est de nos jours plus pour la formulation des bétons et mortier (qualité du sable).

2.4.2. Indice de densité ou densité relative.

Pour caractériser l'état de densité d'un dépôt de sol pulvérulent (type gravier et sable), on est amené à calculer son indice de densité (I_D) ou densité relative (D_r).

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100$$

$\left\{ \begin{array}{l} e_{\min} : \text{indice des vides dans l'état le plus compact ;} \\ e_{\max} : \text{indice des vides dans l'état le moins compact ;} \\ e : \text{indice des vides in situ.} \end{array} \right.$

Le tableau suivant précise l'état de compacité des sols pulvérulents en fonction de leur indice de densité.

I_D	Etat de compacité Du sol grenu
0 - 15	Très peu compact
15 - 35	Peu compact
35 - 65	Compacité moyenne
65 - 85	Compact

I_D	Etat de compacité Du sol grenu
85 - 100	Très compact

Tab. 2.9 : Etat de compacité des sols grenus

Exercice 2.6

1. Le creusement d'une tranchée de drainage a permis de mettre à jour deux couches d'argile dont les caractéristiques sont les suivantes:

(1) $\omega_L = 72$, $I_p = 35$, teneur en eau $\omega = 65\%$

(2) $\omega_L = 72$, $\omega_p = 37$, teneur en eau $\omega = 30\%$

Montrer que les deux argiles ont les mêmes limites d'Atterberg ; calculer leurs indices de consistance respectifs. Qu'en concluez-vous quant à leurs propriétés ?

2. Le remblaiement a nécessité la mise en place d'un poids sec de 49,5kN d'un matériau, ayant en place un volume de 3 m³. Le poids volumique γ_s , des particules solides de ce sol est égal à 27 kN/m³.

Déterminer:

a) la quantité d'eau qui serait nécessaire pour saturer les 3 m³ de remblai;

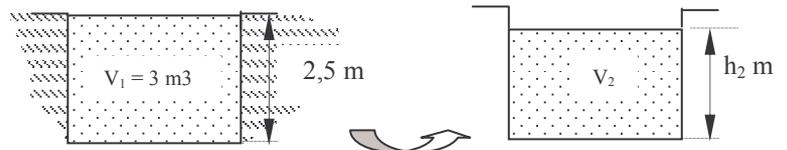
b) l'indice des vides et la teneur en eau de ce sol à saturation;

c) la valeur du poids volumique γ_{sat} du sol à saturation.

3. L'indice des vides vaut au maximum 0,90 et au minimum 0,40.

a) Calculer l'indice de densité correspondant I_D du matériau. Dans quel état de compacité se trouve ce remblai ?

b) Par compactage en masse de ce sol, mis en remblai sur une hauteur de 2,5 m, on obtient un accroissement de l'indice de densité à $\Delta I_D = 0,20$. De combien a tassé, par compactage, la surface du remblai si l'on suppose qu'il ne s'est produit aucune déformation latérale



Réponses :

1) $I_{c1} = 0,2$; $I_{c2} = 1,2$; Etats plastique et solide

1 a) $V_w = 1,17\text{m}^3$; b) $e = 0,64$; $\omega = 24\%$; c) $\gamma = 20,40 \text{ kN/m}^3$;

2 a) $I_D = 52\%$;

b) $e_1 = \frac{V_1 - V_s}{V_s} = 0,64$; $e_2 = \frac{V_2 - V_s}{V_s} = 0,54$; Avec $V_s = \text{cte} = \frac{49,5}{27} = 1,83 \text{ m}^3$ et $V_1 = 2,5 \cdot S = 3 \text{ m}^3$; en

écrivait que $\Delta e = \frac{\Delta V}{V_s} = \frac{\Delta h \cdot S}{V_s} = 0,10$, on obtient $\Delta h \approx 15 \text{ cm}$.

Exercice 2.7

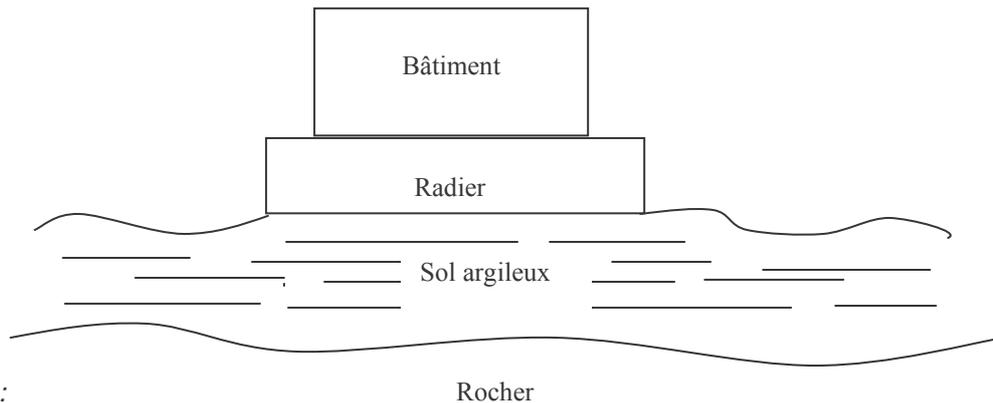
On considère un bâtiment industriel fondé sur un radier de fondation reposant sur une couche de sol argileux saturé de 2,5 m d'épaisseur. Les caractéristiques initiales de cette couche sont :

Poids volumique $\gamma_1 = 19,5 \text{ kN/m}^3$
 Teneur en eau $\omega_1 = 29,2 \%$
 Poids volumique des grains $\gamma_s = 27 \text{ kN/m}^3$

Par suite de l'exécution de la construction, la compacité de la couche augmente et les caractéristiques finales sont:

Poids volumique $\gamma_2 = 19,9 \text{ kN/m}^3$
 Teneur en eau $\omega_2 = 26,6 \%$

Déterminer le tassement du radier en supposant qu'il n'y a aucune déformation latérale du sol autour du radier, sachant qu'on trouve le rocher au-dessous de la couche de sol argileux.



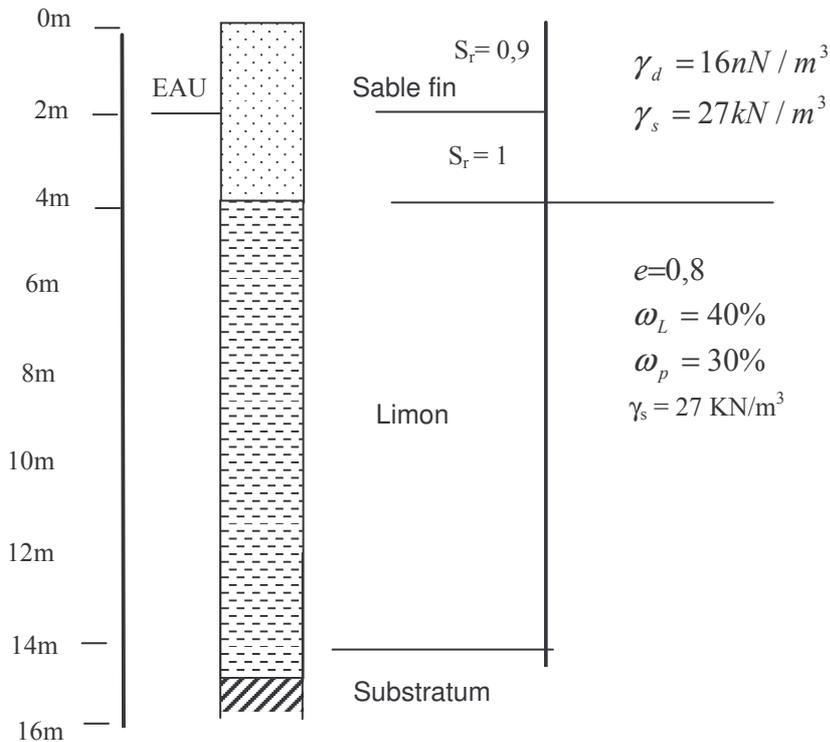
Réponse :

Rocher

Tassement = 0,10m ($\Delta e = 0,07$)

Exercice 2.8

Sur les échantillons d'un sondage dont la coupe est donnée ci-dessous, on a fait des essais d'identification au laboratoire



Déduire de ces données les poids volumiques du sable fin et du limon et l'indice de plasticité du limon.

Réponses : γ (sable, 0-2m) = 19,7 kN/m³ ; γ (sable, 2-4m) = 20,1 kN/m³
 γ (limon) = 19,4kN/m³ ; $I_p = 10$, limon peu plastique LP.

Exercice 2.9

Un remblais autoroutier ayant un volume de 250 000 m³ doit être construit avec un sol dont l'indice des vides sera $e = 0,70$. Si ce sol est pris dans un banc d'emprunt dont l'indice des vides est $e = 1,20$, quel volume de sol devra être pris dans le banc d'emprunt pour construire ce remblai ?

Réponse : $V = 323\,529\text{ m}^3$

3. CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES SOLS.

3.1 But de la classification.

Pour résoudre les problèmes de mécanique des sols, il est important de caractériser un sol mais aussi de les classer, c'est à dire de les mettre dans un groupe ayant des comportements similaires.

Il va de soi qu'une telle classification ne peut être basée que sur des corrélations empiriques, elles-même basées sur une grande expérience.

Il existe de par le monde de nombreuses classification.

3.2.La classification GTR

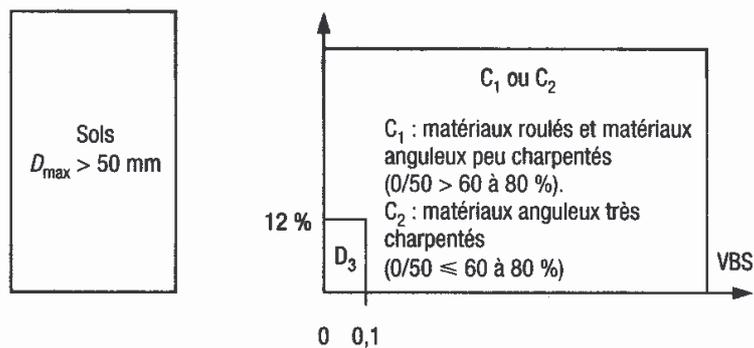
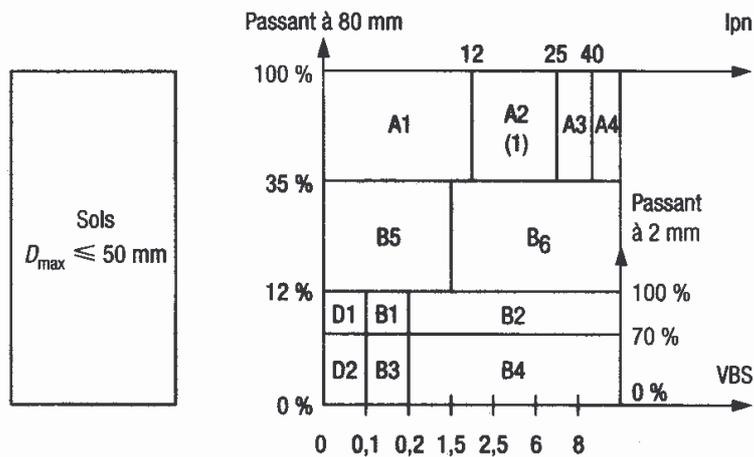
Cette **classification** est la seule **présentant un réel intérêt pratique** et utilisée **dans les travaux de terrassement**. Son utilisation est détaillée dans le *Guide technique pour la réalisation des remblais et couches de forme* ; C'est pour cette raison qu'elle est désignée par *classification GTR*.

Les grandes familles de matériaux de cette classification sont présentées dans le tableau 2.5.ci-dessous.

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{\max} \leq 50\text{mm}$ et passant à $80\mu\text{m} > 35\%$	A1 à A4 selon VBS ou I_p
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{\max} \leq 50\text{mm}$ et passant à $80\mu\text{m} \leq 35\%$	B1 à B6 selon VBS ou I_p et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{\max} > 50\text{mm}$ et passant à $80\mu\text{m} > 12\%$ ou passant à $80\mu\text{m} \leq 12\% +$ VBS>0,1	30 sous-classes selon VBS, I_p et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS ≤ 0,1 et passant à $80\mu\text{m} \leq 12\%$	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	Voir la norme NF P 11-300	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	Voir la norme NF P 11-300	

D_{\max} = diamètre pour lequel 95% des grains du sol ont une dimension inférieure (soit D_{95} si la courbe granulométrique est disponible, sinon appréciation visuelle de la dimension des plus gros éléments)

Tab. 2.10.a : Classification GTR (SETRA)



Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R_1
			Calcaires	R_2
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R_3
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R_4
		Roches salines	Sel gemme, gypse	R_5
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R_6
Matériaux particuliers	Sols organiques et sous-produits industriels			F

Tableau de correspondance

- A : sols fins (limons, argiles...),
- B : sols sableux ou graveleux avec fines (sables et graves argileuses...),
- C : sols comportant des fines et des gros éléments (alluvions grossières, argile à silice...),
- D : sols et roches insensibles à l'eau (sables et graves propres, matériaux rocheux sains...),
- R et F (détaillés ci-dessus) : d'autres essais concernant spécifiquement ces classes.

(1) Classification détaillée de la sous-classe de sol A_2 :

A_2 correspond le plus fréquemment aux sols suivants : sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes. La majorité des outils de terrassement est adaptée à ce type de sol si la teneur en eau n'est pas trop élevée. Dès que I_p est inférieur à 12 (NF P 94-051), il est préférable d'utiliser la valeur de bleu VBS pour identifier le sol.

On retrouve l'utilisation de ce classement dans de nombreuses applications comme le montre les tableaux 2.11, 2.12 et 2.13 ci-après.

Classe	Nature du matériaux	F _f	F _c
A	Argiles, limons, sables argileux (ou encore terre végétale)	1,25	0,90
B	Sables et graves sableuses	1,10	1,00
C	Sol meuble consolidé ou argiles et marnes en mottes (ex.: sol latéritique)	1,35	1,10
D	Sols rocheux défoncés au rippeur, roche altérée	1,30	1,15
R	Matériaux rocheux de carrières	1,40	1,20

Tab. 2.11 : Coefficient de foisonnement et de contre foisonnement

Classe	Nature du matériaux	Temps unitaire h/m ³
A	Argiles, limons, sables argileux (ou encore terre végétale)	1,55 h/m ³
B	Sables et graves sableuses	2,20 h/m ³
C	Sol meuble consolidé ou argiles et marnes en mottes (ex.: sol latéritique)	3,10 h/m ³
D	Sols rocheux défoncés au rippeur, roche altérée	- Sans objet -
R	Matériaux rocheux de carrières	5,00 h/m ³

Tab. 2.12 : Temps unitaire moyen pour des terrassements faits manuellement (équipe de 2 manœuvres)

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code G W T S
B ₄₁ th	Les sols de cette classe contiennent une fraction fine en faible quantité mais cependant suffisante pour leur conférer une grande sensibilité à l'eau. Leur fraction grenue est résistante et ne risque donc pas de se broyer sous l'action du trafic. Pour utiliser ces sols en couche de forme, deux solutions sont applicables :	++ ou + ou = ou -	toutes conditions météorologiques	G : Élimination de la fraction 0/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3
		++ ou +	pluie même forte	G : Élimination de la fraction 0/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3
B ₄₁ h	a) Éliminer par tout moyen <i>ad hoc</i> la fraction 0/d responsable de la sensibilité à l'eau. Le matériau ainsi élaboré devient insensible à l'eau et peut être utilisé en toutes situations météo. Il est toutefois conseillé de répandre en surface une couche de fin réglage de 2 à 3 cm d'épaisseur d'un granulat frottant qui améliorera nettement la traficabilité. b) Traiter ces matériaux avec les liants hydrauliques en place (ou en centrale lorsqu'ils sont dans un état moyen ou sec).	= ou -	pas de pluie	Solution 1 : G : Élimination de la fraction 0/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3
		++ ou +	pluie même forte	Solution 2 : T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 0 1 1
B ₄₁ m		++ ou +	pluie même forte	G : Élimination de la fraction 0/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 : G : Élimination de la fraction 0/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage Solution 2 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	1 0 0 3 0 1 1 1

Tab. 2.13. : Conditions d'utilisation des sols B41 en couche de forme (extrait du Guide Technique Réalisation des Remblais et couche de forme pour route – Editions : SETRA-LCPC)

3.3 La classification LPC des sols.

Cette classification est celle utilisée dans les pays Afrique francophone. Elle a été mise au point en France en 1965 par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Cette classification est une adaptation de la classification U.S.C.S (The Unified Soil Classification System) mis au point par le « Bureau of reclamation » et le « Corps of Engineers » aux Etats Unis

La classification LPC des sols utilise les résultats de l'analyse granulométrique, de l'Equivalent de sable et des limites d'Atterberg.

Suivant la classification LPC, on distingue trois grands types de sols :

- les sols grenus dont 50% d'éléments en poids sont supérieurs à 80 μ ;
- les sols fins dont 50% d'éléments en poids sont inférieurs à 80 μ ;
- les sols organiques dont la teneur en matière organique est élevée

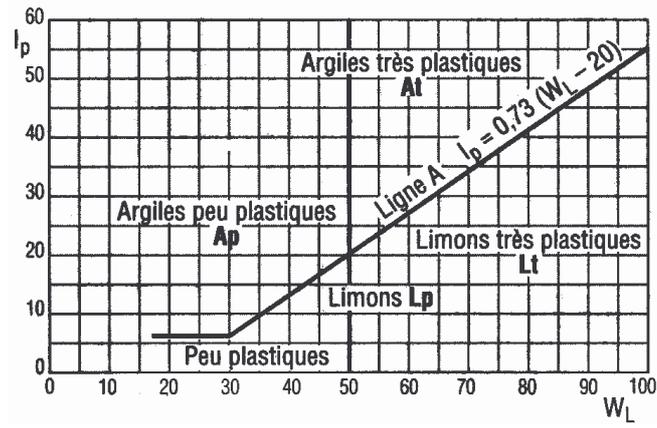
Nous vous proposons ci-après la classification complète qui s'utilise avec le diagramme de plasticité associée :

+ de 50 % des éléments de dimensions $\geq 0,08$ mm Sols grenus	+ de 50 % des éléments de dimensions $\geq 0,08$ mm sont retenus au tamis de 2 mm Grave	- de 5 % des éléments de dimensions $< 0,08$ mm et examiner la courbe granulométrique (1)	$C_u > 4$ et $1 < C_c < 3$	Grave bien graduée (Gb)
			$C_u < 4$ ou $C_c > 3$ ou $C_c < 1$	Grave mal graduée (Gm)
		+ de 12 % des éléments $< 0,08$ mm et faire les limites d'Atterberg, déterminer W_L et W_p et situer le point I_p-W_L (1)	Point situé au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité	Grave limoneuse (GL)
	Point situé au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité		Grave argileuse (GA)	
	+ de 50 % des éléments de dimensions $\geq 0,08$ mm passent au tamis de 2 mm Sable		- de 5 % des éléments $< 0,08$ mm et examiner la courbe granulométrique (1)	$C_u > 6$ et $1 < C_c < 3$
		$C_u < 6$ ou $C_c < 1$ ou $C_c > 3$		Sable mal gradué (Sm)
+ de 12 % des éléments $< 0,08$ mm et faire les limites d'Atterberg, déterminer W_L et W_p et situer le point I_p-W_L dans le diagramme de plasticité (1)		Point situé au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité	Sable limoneux (SL)	
	Point situé au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité	Sable argileux (SA)		
MO(2) $\leq 10\%$ et + de 50 % des éléments de dimensions $< 0,08$ mm Sols fins	MO $\leq 3\%$ Argile (A) ou Limon (L)	Faire les limites d'Atterberg, déterminer W_L et W_p et situer le point I_p-W_L dans le diagramme de plasticité	Point situé au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité et $W_L < 50$	Limon peu plastique (Lp)
			Point situé au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité et $W_L > 50$	Limon très plastique (Lt)
			Point situé au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité et $W_L < 50$	Argile peu plastique (Ap)
			Point situé au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité et $W_L > 50$	Argile très plastique (At)
	3% < MO $\leq 10\%$ Sol faiblement organique (fo)	Faire les limites d'Atterberg, déterminer W_L et W_p et situer le point I_p-W_L dans le diagramme de plasticité	Point situé au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité et $W_L < 50$	Sol faiblement organique limoneux peu plastique (fo-Lp)
			Point situé au-dessous de la ligne A du diagramme de plasticité et $W_L > 50$	Sol faiblement organique limoneux très plastique (fo-Lt)
			Point situé au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité et $W_L < 50$	Sol faiblement organique argileux peu plastique (fo-AP)
			Point situé au-dessus de la ligne A du diagramme de plasticité et $W_L > 50$	Sol faiblement organique argileux très plastique (fo-At)
	MO > 10 % Sols organiques	10% < MO < 30%		Sol moyennement organique (mo)
		MO $\geq 30\%$		Sol très organique (to)

(1) entre 5 et 12 % d'éléments $< 0,08$ mm : cas limite nécessitant le double symbole adapté aux caractéristiques de la courbe granulométrique et de plasticité.
Exemple : Gb-GL = grave bien graduée – grave limoneuse
Sb-SL = sable bien gradué – sable limoneux

(2) MO : matières organiques

Tab. 2.14.a. : Classification LPC

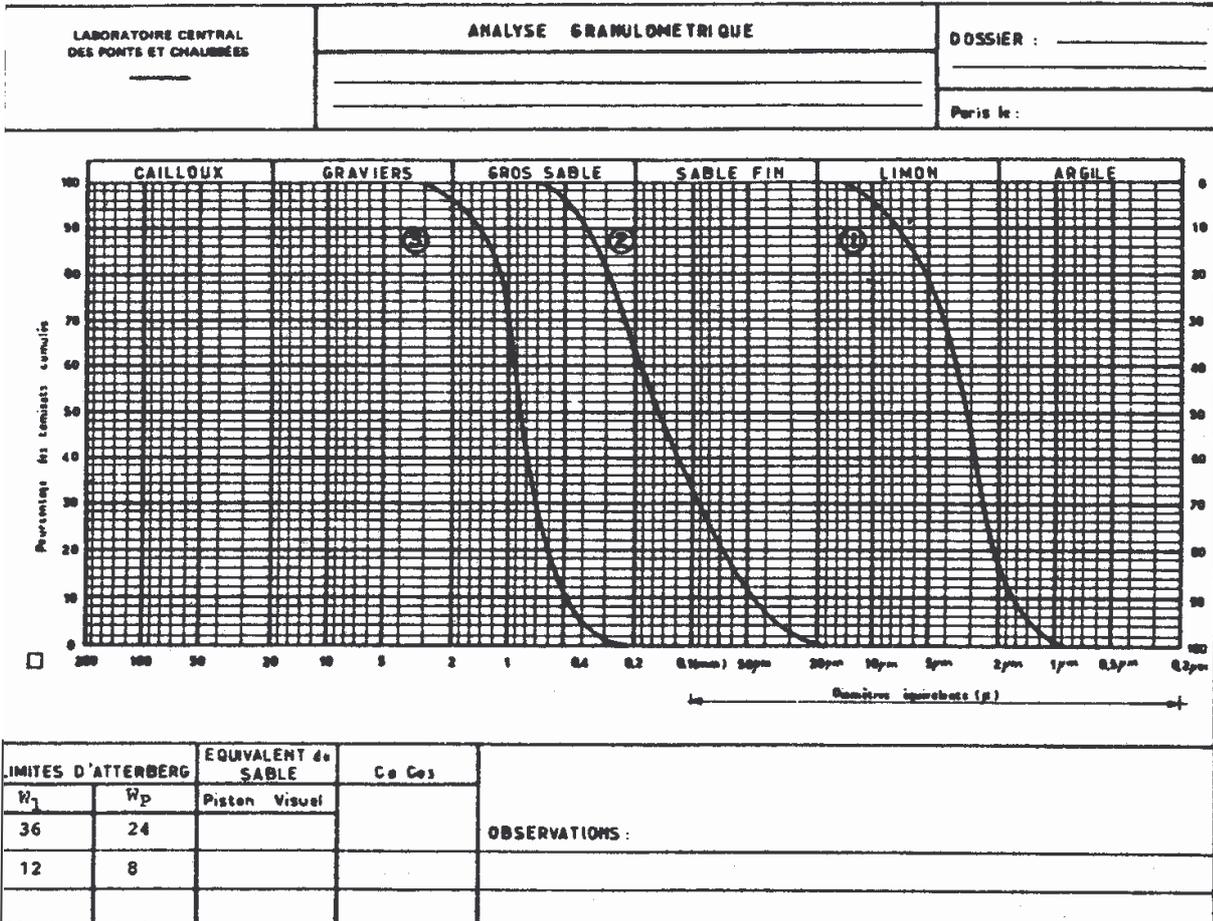


Tab. 2.14.b. : Classification LPC : Diagramme de plasticité

3.4. Exercices

Exercice 2.10

Quelle est la classification géotechnique des sols (1), (2) et (3) dont les courbes granulométriques sont indiquées ci-dessous ?



Réponses

Sol (1) : A_p

Sol (2) : S_L

Sol (3) : S_m

Exercice 2.11

Quelle est la classification géotechnique des sols (1), (2), (3) et (4) dont les courbes granulométriques sont indiquées ci-dessous ?

