

Chapitre II : Identification et classification des sols

II.1 Caractéristiques physiques

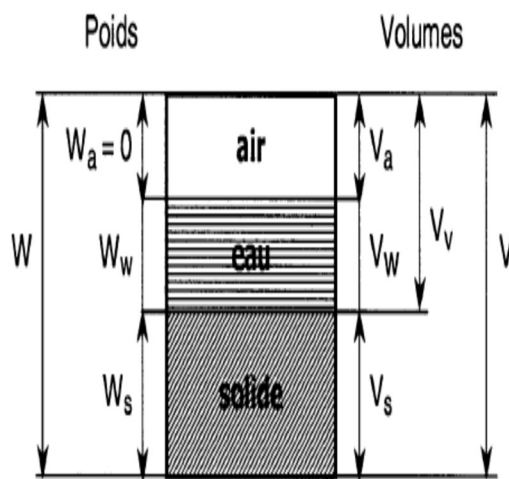
II.2 Caractéristiques granulométriques

II.3 Consistance des sols fins (limites d'Atterberg)

II.4 Classification géotechnique des sols

II.1 Caractéristiques physiques

II. 1. 1 Modèle élémentaire d'un sol : Un sol étant composé de grains solides, d'eau et d'air, on peut rassembler chaque phase en un volume partiel unique de section unit. Les notations suivantes sont utilisées :



Notations conventionnelles :

W : poids total du sol

W_s : poids des particules solides

W_w : poids de l'eau

V : volume total (apparent)

V_s : volume des particules solides

V_v : volume des vides entre les particules

V_w : volume de l'eau

V_a : volume de l'air

avec les relations:

$$W = W_s + W_w ; V_v = V_w + V_a$$

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

Fig.II.1 : Représentation conventionnelle d'un volume de sol (Poids et volumes des différentes phases)

On définit en outre les poids volumiques qui, avec les poids et volumes, constituent :

a- Les paramètres dimensionnels (poids volumiques) :

- le poids volumique des particules solides (de la matière constituant les grains solides), noté γ_s : $\gamma_s = W_s/V_s$; sable et argile = 26 à 27 kN/m³

- le **poids volumique de l'eau**, noté γ_w : $\gamma_w = W_w/V_w = 9,81 \text{ kN/m}^3$. On prend souvent $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$.

- le **poids volumique du sol** (ou poids volumique apparent ou poids volumique humide), noté γ . C'est le rapport du poids total (particules solides et eau) ou volume total du sol.

$\gamma = W/V$; sable = 17 à 20 kN/m³, argile = 16 à 22 kN/m³

- le **poids volumique du sol sec**, noté γ_d :

$\gamma_d = W_s/V$; sable = 14 à 18 kN/m³, argile = 10 à 20 kN/m³. Si le sol est sec : $\gamma = \gamma_d$.

- le **poids volumique du sol saturé**, noté γ_{sat} : lorsque tous les vides sont remplis d'eau.

$\gamma_{sat} = W/V = (W_s + \gamma_w \cdot V_v)/V$; sable et argile = 19 à 22 kN/m³

- le **poids volumique du sol déjaugé**, noté γ'

Il est pris en compte lorsque le sol est entièrement immergé. Il tient compte de la présence de l'eau qui remplit tous les vides et de la poussée d'Archimède :

$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$; sable et argile = 9 à 12 kN/m³

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

On a également la relation : $\gamma' = \gamma_d (1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s})$

- On introduit aussi la notion **masse volumique**, notée ρ_i , et plus rarement celle de **densité** par rapport à l'eau, notée D_i :

Densité : $D_i = \rho_i/\gamma_w \Rightarrow$ densité sèche : $D_d = \gamma_d/\gamma_w$.

b- Les paramètres sans dimensions (paramètres d'état), indiquent dans quelles proportions sont les différentes phases d'un sol. Ils sont très importants et essentiellement variables. On définit :

- La porosité**, notée n , qui permet de connaître l'importance des vides c'est-à-dire de savoir si le sol est dans un état lâche ou dense. Elle est définie comme étant le rapport du volume des **vides** au volume **total**. $n = V_v/V$; sable : $n = 0,25$ à $0,5$, argile : $n = 0,20$ à $0,80$. La porosité est toujours inférieure à 1. Elle peut aussi être exprimée en (%).

- L'indice des vides**, noté e , dont la signification est analogue à celle de la porosité. Il est défini par la relation : $e = V_v/V_s$; sable : $e = 0,5$ à 1 , argile : $e = 0,3$ à 1

- La teneur en eau**, notée w , est définie par le rapport du poids de l'eau au poids des particules solides d'un volume donné de sol. Elle s'exprime en (%).

$w = W_w/W_s \cdot 100$; sable : $w = 1$ à 15% , argile : $w = 10$ à 20%

- **Le degré de saturation**, noté **Sr**, indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Il est défini comme le rapport du volume de l'eau au volume des vides. Il s'exprime en %. $Sr = V_w/V_v \cdot 100$; Le degré de saturation peut varier de 0% (sol sec) à 100% (sol saturé).

- **Densité relative ou indice de densité**, noté **Id**, est définie par l'expression :

$$I_d = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$$

Où :

$e_{\min}$: est l'indice des vides correspondant à l'état le plus compact.

$e_{\max}$: est l'indice des vides correspondant à l'état le plus lâche.

e : est l'indice des vides du sol en place.

Tableau II.1 : Etat de compacité des sols grenus

Id	Etat de compacité du sol grenu
0-15	Très peu compact
15-35	Peu compact
35-65	Compacité moyenne
65-85	Compact
85-100	Très compact

II.1.2 Relations entre les paramètres

Tous les paramètres précédemment définis ne sont pas indépendants. Les relations les plus importantes existant entre ces différents paramètres sont données comme suit :

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)	$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_w + V_a}$	$\gamma = (1-n).(1+\omega).\gamma_s$	$\gamma = \frac{(1+e)}{1+e}.\gamma_s$	-	$\gamma = (1+\omega).\gamma_d$
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)	$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$	$\gamma_s = \frac{\gamma}{(1-n).(1+\omega)}$	$\gamma_s = (1+e).\gamma_d$	$\gamma_s = \frac{\gamma}{(1-n).(1+\omega)}$	$\gamma_s = \frac{\gamma_d}{(1-n)}$

II.2 Caractéristiques granulométriques

II.2.1 Analyse granulométrique et sédimentométrie (NF P 94-056 & -057)

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

- _ Par **tamissage** (tamis à maille carrée) pour les grains de diamètre supérieur à 80μ ,
- _ 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 « % » de particule, le poids (ou masse) « % » 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.

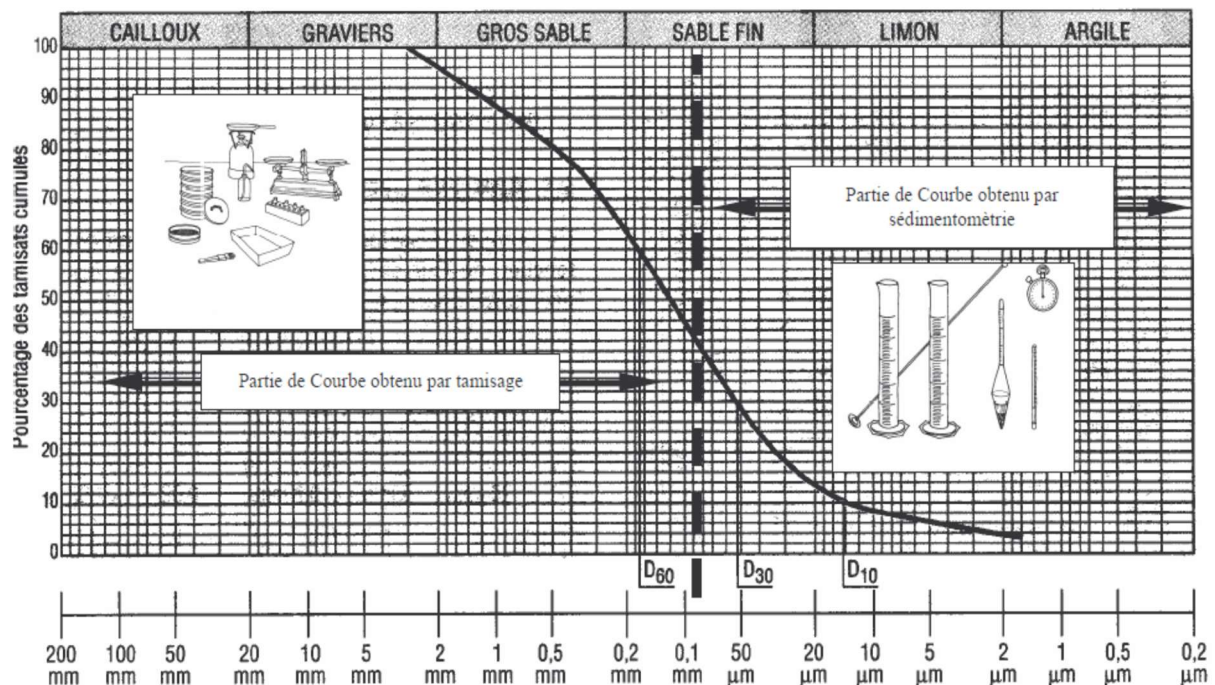


Fig. 2.2 Courbe granulométrique

II.2.2 L'interprétation des courbes granulométriques

A première vue, une courbe granulométrique permet d'identifier les types de sols qui composent l'échantillon analysé. Si en examinant une courbe granulométrique, d'un échantillon constitué de gravier, de sable, de silt et d'argile, on trouve les proportions respectives de chaque type de sol exprimées en pourcentages. Quand on connaît ces proportions, il devient possible d'attribuer au sol une appellation de la manière indiquée au tableau 2.2. Ainsi, si le sol est composé de 27% de gravier, à 38% de sable, à 29% de silt et à 6% d'argile par exemple, il porte le nom de sable silteux graveleux avec traces d'argile

Tab.2.2 : Appellation des sols selon la proportion des types de sols.

Proportion des types de sols	Terminologie	Exemples
> 35%	Nom	Gravier, sable, silt, etc.
20% à 35%	Adjectif	Graveleux, sableux, etc.
10% à 20%	Un peu	Un peu de silt, de sable, etc.
< 10%	Des traces	Avec des traces d'argiles, de silt, etc.

La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par le coefficient d'uniformité (coefficient de Hazen), et le coefficient de courbure:

a- coefficient d'uniformité : permet d'exprimer l'étalement de la courbe granulométrique :

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

Où:

D_{60} = diamètre effectif des particules qui correspond à 60% du passant.

D_{10} = diamètre effectif des particules qui correspond à 10% du passant.

Selon la valeur du coefficient d'uniformité, on reconnaît cinq classes de granulométrie (**Tab.2.2**):

Tab.II.2 : Classes de granulométrie de sols.

Coefficient d'uniformité	Classes de granulométrie
$Cu \leq 2$	granulométrie très serrée.
$2 < Cu \leq 5$	granulométrie serrée.
$5 < Cu \leq 20$	granulométrie semi-étalée.
$20 < Cu \leq 200$	granulométrie étalée.
$200 < Cu$	granulométrie très étalée.

b- coefficient de courbure : permet de décrire la forme de la courbe granulométrique :

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

Où :

D_{30} = diamètre effectif des particules qui correspond à 30% du passant.

Lorsque certaines conditions sur C_u et C_c sont satisfaites ($1 \leq C_c \leq 3$), 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 ($1 > C_c > 3$), avec prédominance d'une fraction particulière, il est dit mal gradué.

II.3 Consistance des sols fins (limites d'Atterberg)

II.3.1 Définition

La consistance des sols cohérents, tels que les argiles et les limons, dépend de leur teneur en eau et détermine leur résistance à la déformation. En augmentant la teneur en eau, la cohésion entre les particules diminue, ce qui entraîne une consistance plus molle et une plus grande facilité de déformation du sol.

Les quatre principaux états de consistance des sols cohérents, classés en fonction de leur teneur en eau croissante, sont :

1. **État solide** : Les particules sont en contact étroit, avec des films d'eau adsorbée très minces. Le sol présente une forte résistance au cisaillement et se déforme peu sous l'effet d'une charge, se comportant de manière fragile, similaire à une brique.
2. **État semi-solide** : Avec une faible augmentation de la teneur en eau, les films d'eau adsorbée s'épaississent légèrement, provoquant un retrait lors de l'assèchement. Le sol peut se fissurer sous l'effet de charges.
3. **État plastique** : Une teneur en eau plus élevée éloigne davantage les particules. Le sol devient malléable, se déformant sans fissures sous de petites charges, avec une consistance variant de celle du beurre mou à celle d'un massif ferme.
4. **État liquide** : À très forte teneur en eau, la cohésion entre les particules disparaît presque entièrement. Le sol se comporte comme un liquide visqueux, avec une consistance allant de celle d'une soupe épaisse à celle du beurre mou.

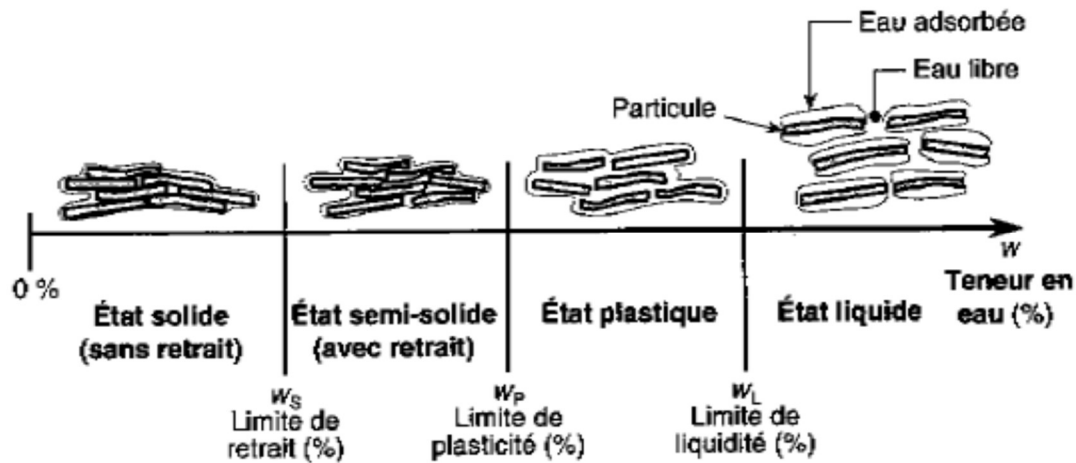


Fig.2.3 Etats de consistance

II.3.2 Limite d'Atterberg

Les limites d'Atterberg définissent les transitions entre les états de consistance des sols en fonction de leur teneur en eau :

- **Limite de retrait (w_s)** : seuil à partir duquel le sol change de volume, séparant l'état solide du semi-solide.
- **Limite de plasticité (w_p)** : seuil où le sol perd sa plasticité et se fissure sous faible charge, séparant l'état semi-solide du plastique.
- **Limite de liquidité (w_l)** : seuil où le sol devient fluide, séparant l'état plastique du liquide.

II.3.3 Indice de plasticité et de liquidité

- **L'indice de plasticité (I_p)** est défini comme la différence entre la limite de liquidité (w_l) et la limite de plasticité (w_p) :

$$I_p (\%) = w_l - w_p$$

Cet indice, mesure l'étendue de la plage de teneur en eau dans laquelle le sol se trouve à l'état plastique.

Tableau 2.3 Classification de l'argile selon l'indice de plasticité I_p

L'indice de plasticité (I_p)	Etat du sol
0-5	Non plastique
5-15	Peu plastique
15-40	Plastique
>40	Très plastique

- **L'indice de liquidité (I_L)** permet de déterminer l'état de consistance d'un sol en comparant sa teneur en eau naturelle (w) à ses limites de plasticité et de liquidité. Il est calculé selon la formule suivante :

$$I_L = (w - w_p) / I_p$$

En fonction de la valeur de l'indice de liquidité, le sol peut être classé comme suit :

- $I_L > 1$: sol à l'état liquide
- $0 < I_L < 1$: sol à l'état plastique
- $I_L = 0$: sol à la limite de plasticité
- $I_L < 0$: sol à l'état semi-solide ou solide
- **Indice de consistance (I_c)**, Il s'agit d'un indicateur dérivé qui caractérise l'état hydrique d'un sol :

$$I_c = (w_L - w) / (w_L - w_p) = (w_L - w) / I_p$$

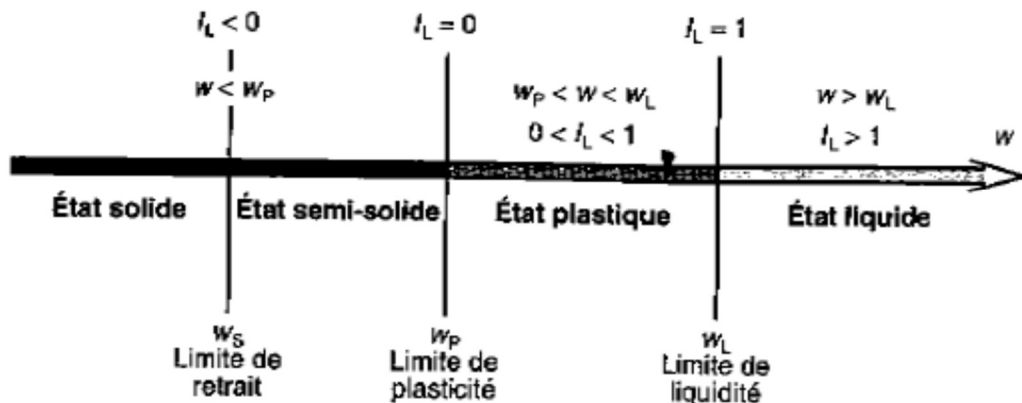


Fig.2.4 : Limites d'Atterberg indice de liquidité.

II.3.4 Le diagramme de plasticité

En 1932, Casagrande proposa un diagramme de plasticité (Fig.2.5) permettant d'identifier les sols à grains fins à partir des limites d'Atterberg. Le diagramme est divisé en deux zones par la ligne A, chaque zone étant elle-même subdivisée en trois régions, selon la plasticité des sols.

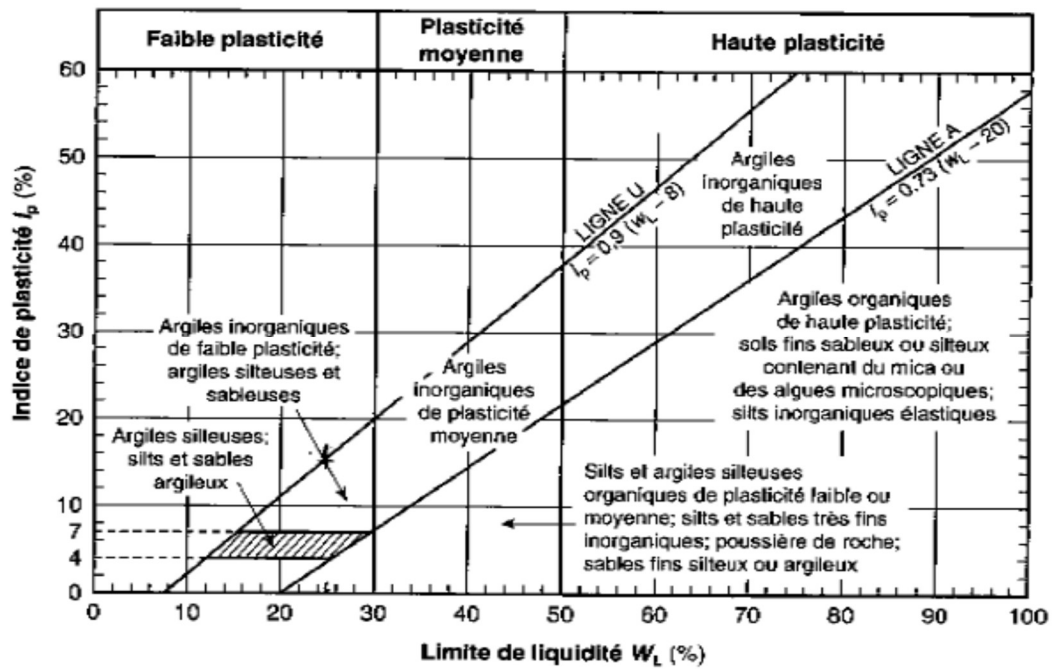


Fig.2.5 : Diagramme de plasticité (d'après Casagrande 1948).

II.4 Classification géotechnique des sols

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. Ils permettent de prévoir le comportement des sols et d'assurer la fiabilité et la durabilité des infrastructures. Il existe de par le monde de nombreuses classifications.

II.4.1 Classification LPC/USCS des sols :

La classification LPC (1965) utilise les résultats d'essais classiques d'identification des sols :

- **Des critères granulométriques :**

- les pourcentages de gravier, sable et particules fines (tamisats à 2 mm et 0,08 mm);
- la forme de la courbe granulométrique :

- coefficient d'uniformité ou de Hazen C_u ,
- coefficient de courbure C_c ;

- **Les caractéristiques de plasticité w_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.**

La classification peut également s'effectuer à partir de l'observation visuelle du sol et de tests simples de chantier.

Tab.2.4 : Les groupes de sols.

Éléments du sol	Granularité du sol	Plasticité du sol
G : Gravier. Le gravier est la fraction principale S : Sable. Le sable est la fraction principale L : Limon ou limoneux A : Argile ou argileux T : Tourbe O : Organique. Le sol contient des matières organiques	b : Bien gradué m : Mal gradué	t : Très plastique p : Peu plastique

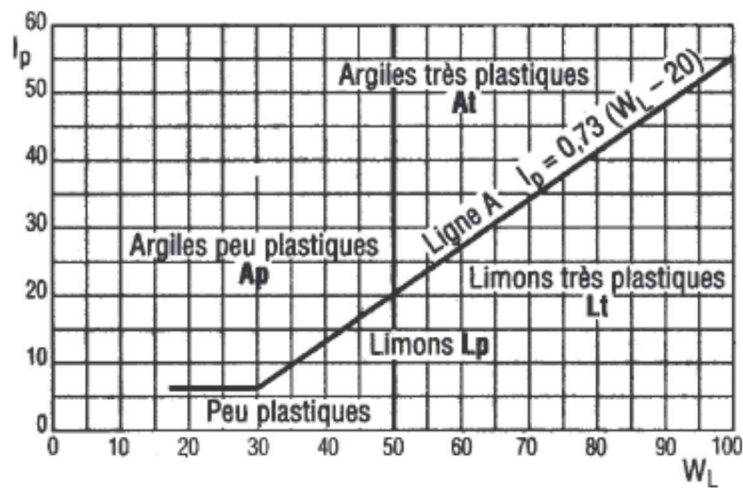


Fig. 2.6 : Classification LPC des sols fins en laboratoire. Diagramme de plasticité

Tab.2.4 : Classification des sols grenus (plus de 50 % d'éléments > 0,08 mm)

Définitions			Symbole LPC (USCS)	Conditions	Appellations
Graves	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	$Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ et $1 < Cc = (D_{30})^2 / D_{10}D_{60} < 3$	Grave propre bien graduée
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	Gm (GP)	Une des conditions de Gb n'est pas satisfaite	Grave propre mal graduée
			GL (GM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Grave limoneuse
		GA (GC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave Argileuse	
Sable	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	Sb (SW)	$Cu = D_{60}/D_{10} > 6$ et $1 < Cc = (D_{30})^2 / D_{10}D_{60} < 3$	Sable propre bien gradué
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	Sm (SP)	Une des conditions de Sb n'est pas satisfaite	Sable propre mal gradué
			SL (SM)	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Sable limoneux
		SA (SC)	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave Argileux	
Lorsque la teneur en particules fines (< 0,08 mm) est comprise entre 5% et 12% on utilise un double symbole. Par exemple : Sb-SL					

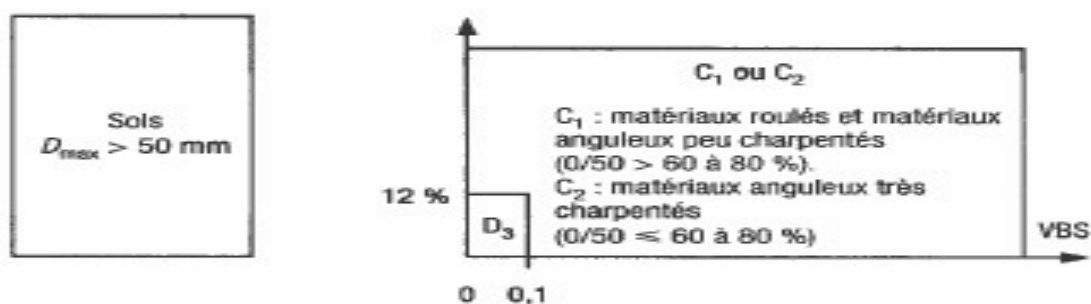
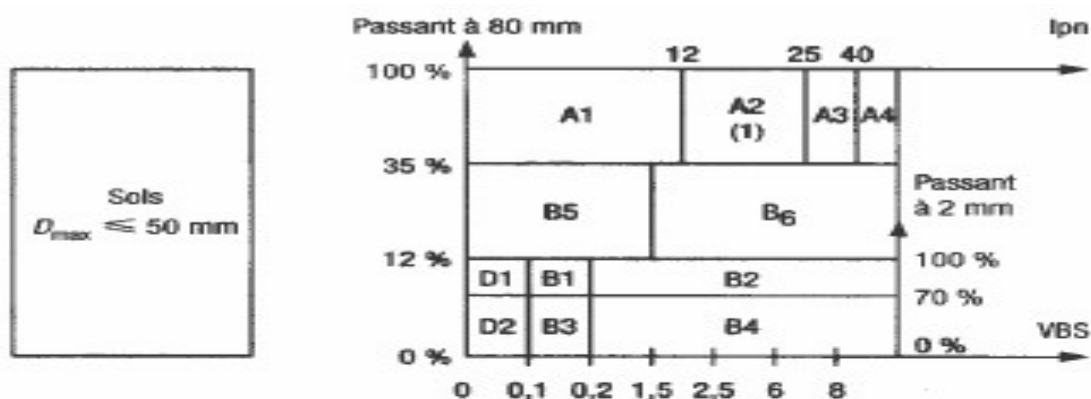
II.4.2 la classification GTR

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 des couches de forme ; C'est pour cette raison qu'elle est désignée par classification GTR.

Tab. 2.5 Classification GTR (SETRA)

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50mm$ et passant à $80\mu m > 35\%$	A1 à A4 selon VBS ou I_p
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50mm$ et passant à $80\mu m \leq 35\%$	B1 à B6 selon VBS ou I_p et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50mm$ et passant à $80\mu m > 12\%$ ou passant à $80\mu m \leq 12\% +$ $VBS > 0,1$	30 sous-classes selon VBS, I_p et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	$VBS \leq 0,1$ et passant à $80\mu m \leq 12\%$	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)



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