

Chapitre I : Caractéristiques physiques et classification des sols

I.1. Définition de la Géotechnique

La géotechnique c'est une science qui englobe toutes les activités liées aux applications de la mécanique des sols, de la mécanique des roches et de la géologie de l'ingénieur.

Les sols et les roches font partie des matériaux étudiés par la Géotechnique en vue de les exploiter en tant que matériaux de construction (Barrage, remblai routier, assise pour les fondations...etc) ou en tant que milieu de stockage (déchets ménager et industrielle) et encore comme milieu d'insertion des ouvrages souterrains (tunnel, galeries minières, etc).

La formation d'un sol résulte en général du dépôt de couches de matériaux souvent différents, correspondant à plusieurs âges Géologiques. Dans un projet de construction, l'étude de l'histoire Géologique d'un sol est importante et peut expliquer plusieurs propriétés physiques et mécaniques d'un sol, ainsi que certains phénomènes dont on doit tenir compte lors de dimensionnement des fondations et des poteaux pendant l'étude.

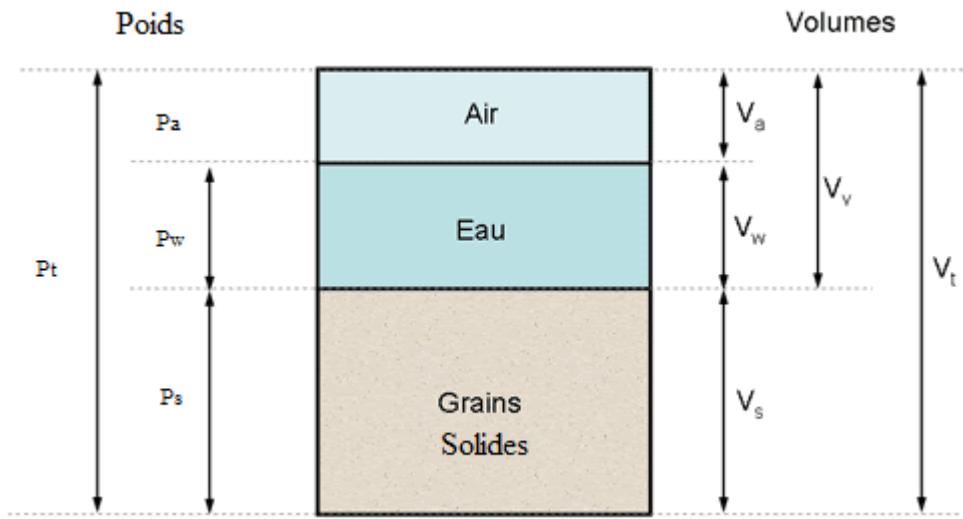
Dans ce cours on s'intéressera que de la Mécanique des sols

I.2. Formation de sols

Les sols sont des formations naturelles d'épaisseurs variés constitués suite à l'altération des roches saines à la surface de l'écorce terrestre, sous à l'action de processus physique, chimique et biologique. Les sols contiennent aussi de la matière organique. Il y a un sol qui se forme sur place sans transport, ce qui correspond alors à un sol résiduel ou être transporté par l'eau ou le vent appelé sol transporté (sol meuble de faible portance). Dans la nature les sols les plus répondu sont les sables et les argiles.

I.3. Propriétés physiques des sols

Une couche de sol est généralement constituée d'un squelette granulaire, formé de grains de différentes tailles et formes, et de vides, qui peuvent être rempli d'air et/ou eau, comme le montre la figure 1.



II- Détermination des caractéristiques physiques

II-1- Identification de la Teneur en eau naturelle (norme N F P 94-050)

C'est la caractéristique la plus facile à déterminer. La teneur en eau se détermine par deux pesées. Une première pesée de l'échantillon à l'état initial donne la masse m de l'échantillon humide et une deuxième pesée après passage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures (évaporation de l'eau libre et de l'eau capillaire), donne la masse sèche de l'échantillon M_s .

$$\omega = W_w / W_s \text{ (exprimée, en %)}$$

II-2- Caractéristiques dimensionnels

1-Forme

On peut distinguer 3 catégories de formes :

- Les particules sphériques/cubiques (arrondies/anguleuses) : cas des sols grenus (sables).
- Les particules en plaquettes: cas des sols fins (Argiles).
- Les particules en aiguilles.

2- Dimensions

Supposons un sol dont les grains solides ont des dimensions peu différentes les unes des autres (sol dit à granulométrie uniforme)

Suivant la taille des grains on définit les catégories de sols suivantes (basées sur le nombre 2 et la progression géométrique de rapport 10):

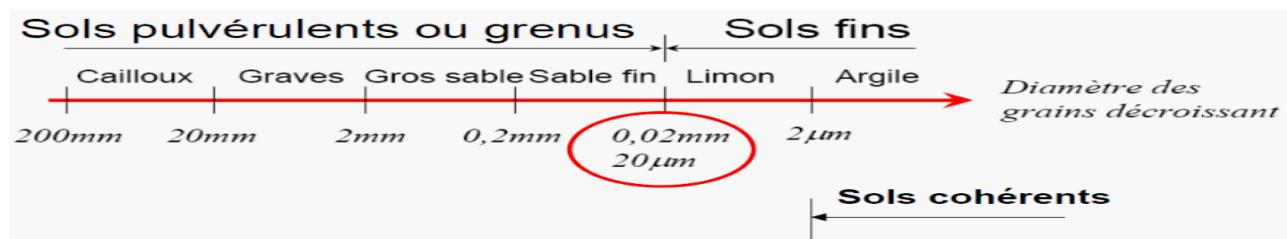


Fig.02. Classification des particules solides d'un sol

II-2-1- Caractéristiques granulométriques

a- Courbe granulométrique :

La façon la plus courante de représenter les résultats des essais de tamisage et de sédimentométrie consiste à tracer *une courbe granulométrique*. Elle représente le poids des tamisat cumulés (échelle arithmétique) en fonction du diamètre D ou du diamètre équivalent des particules solides (échelle logarithmique). La courbe granulométrique donne le pourcentage en Poids des particules de taille inférieure ou égale à un diamètre donné (pourcentage du poids total de la matière sèche de l'échantillon étudié). Les coordonnées semi-logarithmique permettent une représentation plus précise des fines particules dont l'influence est capitale sur le comportement des sols.

La courbe granulométrique nous a permis de calculer les diamètres efficaces des sols appelés D60, D30 et D10

D60 : Diamètre efficace en mm correspond au tamisat cumulés égal à 60%.

D30 : Diamètre efficace en mm correspond au tamisat cumulés égal à 30%.

D10 : Diamètre efficace en mm correspond au tamisat cumulés égal à 10%.

Ces diamètres efficaces nous permettent aussi de calculer deux coefficients qui sont indispensable dans la classification des sols.

La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par un coefficient d'uniformité ou coefficient de HAZEN :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Le coefficient **C_u** nous a permis de savoir si la granulométrie est établie ou serrée :

Pour **C_u** < 2 : granulométrie uniforme (serrée)

Pour **C_u** > 2 : granulométrie étalée

Plus la granulométrie est serrée plus la pente médiane de la courbe est prononcée. On définit aussi le coefficient de courbure:

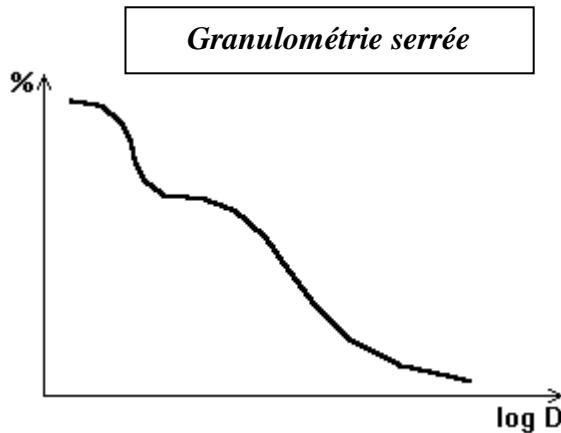
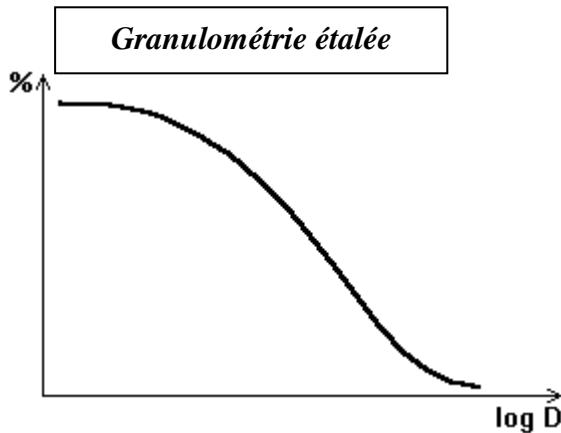
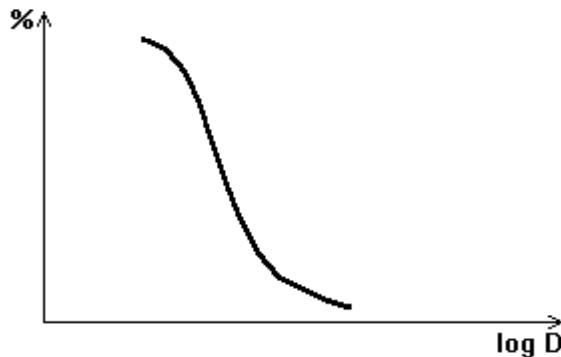
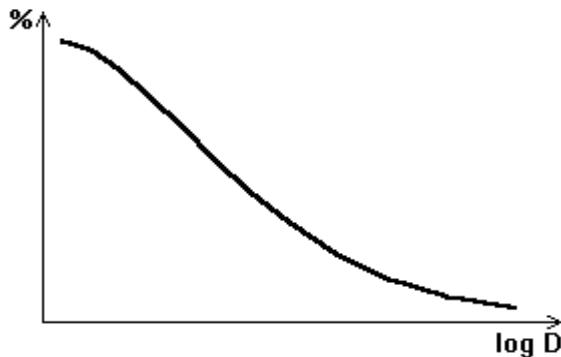
$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Ce coefficient vient un complément du Cu dans la classification LCPC des sols (voir tableau de classification des sols LCPC) afin de déterminer si la granulométrie est bien graduée ou mal graduée (un sol mal graduée si une fraction de grains prédomine).

Les sols bien gradués constituent des dépôts naturellement denses avec une capacité portante élevée. Ils peuvent être aisément compactées en remblais et forment des pentes stables.

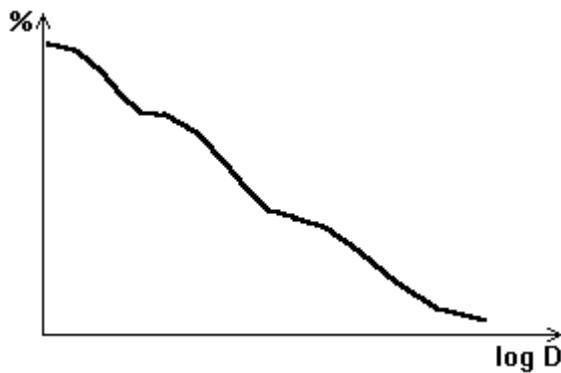
Continuité-discontinuité : on dit que la courbe granulométrique est continue si entre deux granulats élémentaires consécutifs présente il marque au plus granulats élémentaires, il ya discontinuité si l'absence porte sur de 3 granulats élémentaires.

Selon la forme de la courbe, on dit que la granulométrie est :

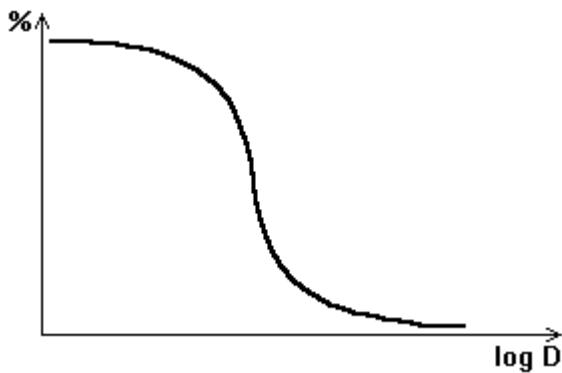


Granulométrie continue

Granulométrie discontinue



Granulométrie bien graduée



Granulométrie mal graduée

II-2-2- Utilisation des courbes granulométriques

La construction de ces courbes est l'un des facteurs de base d'identification et de classification des sols

- En géotechnique routière on utilise les fuseaux de **TALBOT** Pour choisir les matériaux pour une couche de fondation, une couche de base ou une couche de roulement pour éviter les déformations de la chaussée.
- En construction les courbes granulométriques nous permettent de choisir et de corriger la bonne granulométrie pour les sables et les graviers qu'on utilise pour fabriquer le béton.

II-3- Surface spécifique

On appelle surface spécifique la surface des grains par unité de masse. Elle dépend principalement de la taille des grains (dans une moindre mesure de la forme des grains). Elle peut varier de 0,3 m²/g pour les sables fins à plusieurs centaines de m²/g pour les argiles de type Montmorillonite.

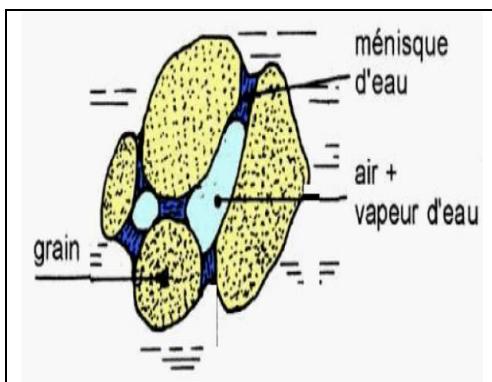
II-4- Structure des sols

II-4-1 -Structure des sols pulvérulents (sols grenus)

D > 20 µm (exemple: les sables).

Les grains se détachent les uns sur les autres sous leurs poids. Les principales forces intervenant dans l'équilibre de la structure sont les forces de pesanteur; c'est par des réactions de contact grain à grain qu'un ensemble stable peut exister. Cette stabilité sera d'autant meilleure que le nombre de contacts sera élevé (sol bien gradué).

Dans le cas de sols humides non saturés (fig.3-a) : l'eau est retenue, sous forme de ménisques au voisinage des points de contacts entre les grains, par des forces de capillarité; elle crée entre ces derniers des forces d'attraction. Le matériau présente une cohésion capillaire (châteaux de sable). Les forces capillaires ont négligeables devant les forces de pesanteur.



a-Sol humide et non saturé

II-5- Les limites d'Atterberg (essai propre aux sols fins)

La consistance d'un sol varie dans des proportions importantes en fonction de la teneur en eau; ceci est lié à l'importance plus ou moins grande des couches d'eau adsorbées autour des ses grains et plus généralement aux propriétés colloïdales des argiles et à leur proportion dans le sol considéré :

- Si la teneur en eau est élevée, les forces de cohésion ne sont pas assez importantes pour maintenir en place les particules de sol. Ce dernier se comporte sensiblement comme un fluide (boue). Il est à l'état **liquide** (le sol tend à s'étaler si on le dépose sur une surface horizontale).
- Si la teneur en eau diminue, le sol peut être modelé sans qu'il s'effrite et conserve sa forme. Les particules sont rapprochées car l'eau adsorbée est mise en commun (les grains sont reliés entre eux par des molécules d'eau. Le sol est alors à l'état **plastique**. (posé sur une surface horizontale, il ne s'étale pas mais n'offre aucune résistance à l'action d'une charge même très faible.).
- Si la teneur en eau diminue encore, les grains deviennent très rapprochés; le sol ne peut plus être modelé et se fend lorsqu'on le travaille, c'est l'état **solide** (Fig.04).

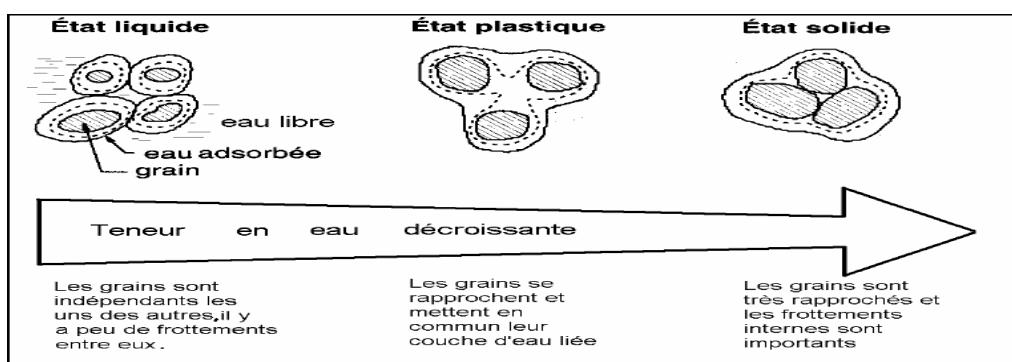


Fig.4. Etats possibles d'un sol.

La transition d'un état de consistance à l'autre n'est pas visible à l'œil nu, elle se produit progressivement. Ces limites sont mesurées sur la fraction de sol passant au travers du tamis 0.4 mm. Cependant, on utilise généralement trois limites universellement appelées limites d'Atterberg (1911).

- **Limite de liquidité (W_L):** teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique.
- **Limite de plasticité (W_P):** teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide. (*Fig.05*).
- **La limite de retrait WR :** teneur en eau qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait (elle correspond à la quantité d'eau juste nécessaire pour combler les vides d'un sol lorsque celui-ci est à son volume minimum).

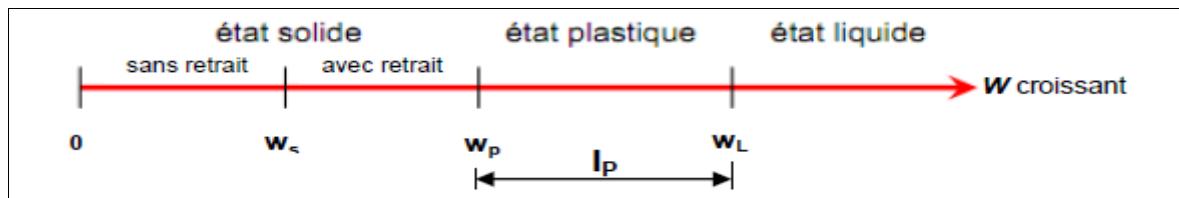
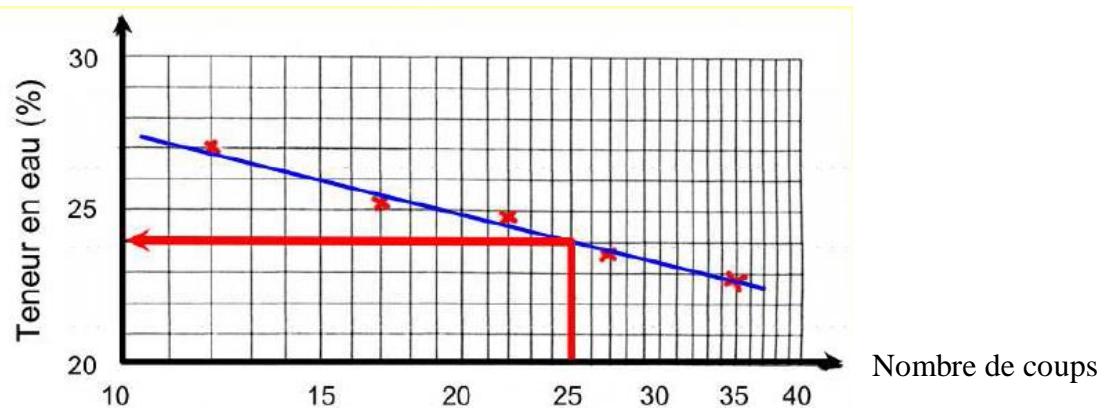


Fig.05. Représentation schématique des limites d'Atterberg.

Citons les ordres de grandeurs suivants:

Sol	W_L
Sable argileux	15-40
Vase	300-100
Limon	50-100
Marne	40-90
Argile sableuse	50-150
Argile	80-180
Tourbe	120-150
Colloïdes	250-600

Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture en 25 chocs. Si on étudie la relation qui lie le nombre de chocs N à la teneur en eau W , on constate que la courbe représentative de cette relation est une droite en coordonnées semi-logarithmiques (échelle arithmétique pour les teneurs en eau, logarithmique pour le nombre de coups). Lorsque le nombre de chocs est compris entre 15 et 35. On réalise quatre essais qui doivent s'échelonner régulièrement entre 15 et 35 et on trouve la limite de liquidité comme étant la valeur correspondante à un nombre de chocs égale à 25 coups. La droite la plus représentative est ensuite tracée à partir des points expérimentaux (*Fig.06*).

**Fig.06.** Détermination de la limite de liquidité (W_L)

- Détermination de limite de plasticité W_P

1. Prendre un peu de matériau et former une petite boule.
2. Rouler à la main sur la plaque de marbre cette boule afin d'obtenir un bâtonnet.

Trois cas peuvent se présenter :

- Le bâtonnet commence à se fissurer quand il atteint une longueur de 10 cm et un diamètre de 3 mm. Dans ce cas, le sol est à la limite de plasticité et il faut mesurer sa teneur en eau.
- Le sol est encore fluide et vous n'arrivez pas à confectionner le bâtonnet. Il faut sécher un peu le matériau.
- Le bâtonnet commence à se fissurer trop tôt, le matériau est sec. Il faut l'humidifier un peu.

Il faut réaliser au moins deux essais pour la limite de plasticité.

II.6. Calculs

-Pour le calcul de la limite de liquidité, Comme il est difficile d'obtenir la fermeture à 25 coups, il existe une relation permettant de trouver W_L à partir d'un seul essai pourvu que le nombre de coups de fermeture soit compris entre 15 et 35. On applique la relation:

$$W_L = \omega_N \cdot \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121}$$

ω_N : est la teneur en eau correspondante au nombre de coups N.

On fera la moyenne des trois essais.

-Pour le calcul de la limite de plasticité, on fera la moyenne des teneurs en eau des deux essais.

II-6-1- Interprétation des limites d'Atterberg

En général, dans leur état naturel, les sols ont une teneur en eau W_0 comprise entre W_P et W_L .

- Indice de plasticité

L'indice de plasticité est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. Il mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. $I_p = w_L - w_p$. L'indice de plasticité permet de définir le degré de plasticité d'un sol, comme le montre le tableau suivant :

L'indice de plasticité (I_p)	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique
$5 < I_p < 15$	Peu plastique
$15 < I_p < 40$	plastique
$I_p > 40$	Très plastique

- L'indice de consistance (Ic)

La comparaison entre la teneur en eau naturelle du sol W_0 et les limites d'Atterberg, permet d'avoir une idée de l'état de consistance du sol en place (**Tab.02**). On définit pour cela l'indice de consistance :

$$I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_p} \quad \text{ou} \quad I_c = \frac{w_L - w}{I_p}$$

Si $I_c > 1$, le sol est à l'état solide.

Si $0 < I_c < 1$, le sol est à l'état plastique.

Si $I_c < 1$, le sol est à l'état liquide.

Tableau.02 Classification des sols selon leur Indice de Consistance

Ic	0	0.25	0.5	0.75	1
Consistance	Liquide	Pâteuse	Molle	Ferme	Très dure

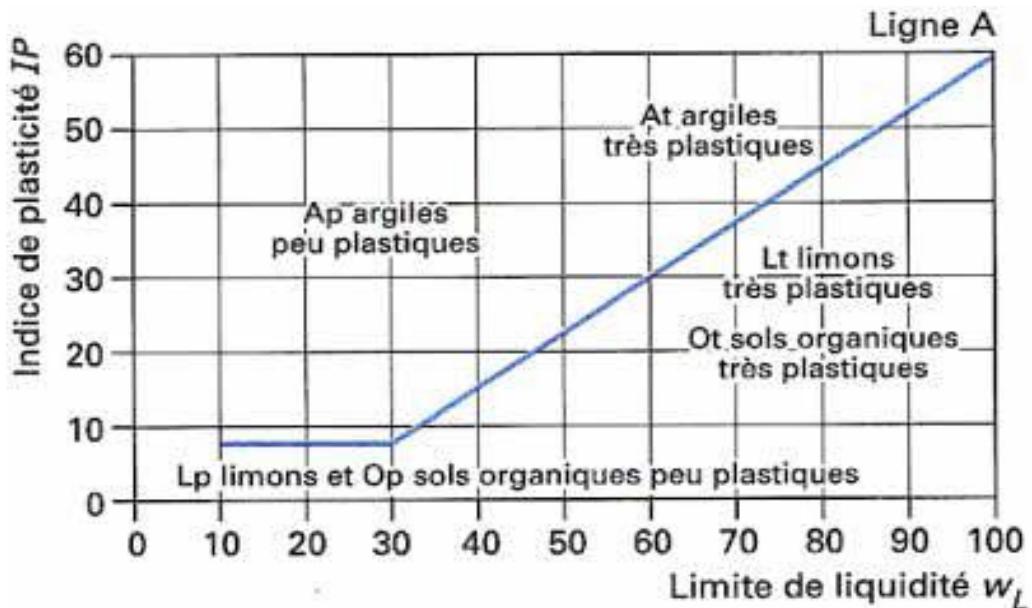
II-6-2- Diagramme de Casagrande

Il s'agit d'un diagramme qui permet de classer les sols fins en 4 catégories selon les valeurs de WL et IP.

Pour des sols de même origine, les limites de plasticité et de liquidité ou encore l'indice de plasticité et la limite de liquidité sont liés par une relation linéaire empirique de forme générale :

$I_p = a (w_L - b)$; La droite moyenne a pour équation la relation suivante, dite relation de Casagrande : $I_p = 0,73 (w_L - 20)$

Cette droite (ligne A) est tracée sur figure avec des données relative à différents sols naturels elle sera utilisée pour la classification des sols fins :



L'activité des argiles (Ac) : par définition l'activité des argiles est le rapport de l'indice de plasticité sur la teneur en argile d'un échantillon. La teneur en argile est celle définie comme le pourcentage des éléments de dimension inférieur à $2 \mu\text{m}$.

$$Ac = \frac{I_p}{\% \text{ éléments inférieurs à } 2 \mu\text{m}}$$

- Exemple d'application

Des essais des limites d'Atterberg ont été effectués au laboratoire sur un échantillon de sol, les résultats sont les suivants :

Tare N°	Limite de liquidité				Limite de plasticité		
	01	02	03	04	A	B	C
Nombre de coups	29	24	19	15	-	-	-
Masse totale humide	29.5	29.1	29.3	29.8	23.5	23.0	23.2
Masse totale sèche	27.4	27.8	27.2	27.6	22.9	22.5	22.7
Masse de la tare	18.00	18.01	18.00	18.00	18.02	18.00	18.01
Masse humide							
Masse sec							
Masse de l'eau							
Teneur en eau (W%)							
(WL%)					(Wp%) =.....		

Compte rendu

Il vous est demandé de :

- Compléter le tableau de calcul précédent,
- Calculer l'indice de plasticité I_p et l'indice de consistance I_c ,
- Comparer les résultats obtenus de W_L , avec ceux donnés par la formule approchée :

$$W_L = \omega_N \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121}$$

- Commenter vos résultats
- Classer ce sol à l'aide de l'abaque de plasticité de Casagrande

II -7- Autres Essais

Des essais complémentaires peuvent être réalisés. Il s'agit de :

- L'analyse minéralogique,
- La teneur en matière organique,
- La teneur en carbonates de calcium.

III – Classification des sols

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

III-1- Classification triangulaire

Elle est surtout utilisée par les Agronomes à partir des pourcentages relatifs en poids des sables, limons et Argiles dans le sol considéré. Ces pourcentages sont donnés par granulométrie et sédimentométrie.

III-2- Classification L.C.P.C (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)

Il s'agit de la classification couramment utilisée en France dans le secteur du bâtiment; elle s'appuie sur l'étude granulométrique et sur les limites d'Atterberg. Cette classification distingue 8 catégories pour les sols grenus (voir tableau joint).

Pour les sols fins, elle s'appuie sur le diagramme de Casagrande (voir diagramme II.5.2)

III-3- Autres classifications

Il existe d'autres classifications suivant les pays, mais aussi en fonction du domaine d'activité; citons notamment la **classification du “Guide des Terrassements Routiers”** qui propose une classification des sols utilisables en remblais et couche de forme d'infrastructures routières.

Cette classification outre l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg utilise des essais supplémentaires tel l'essai **d'Equivalent Sable** et l'essai **de Valeur au Bleu de méthylène**.