



MODULE : MDS (2^e année LMD ST)

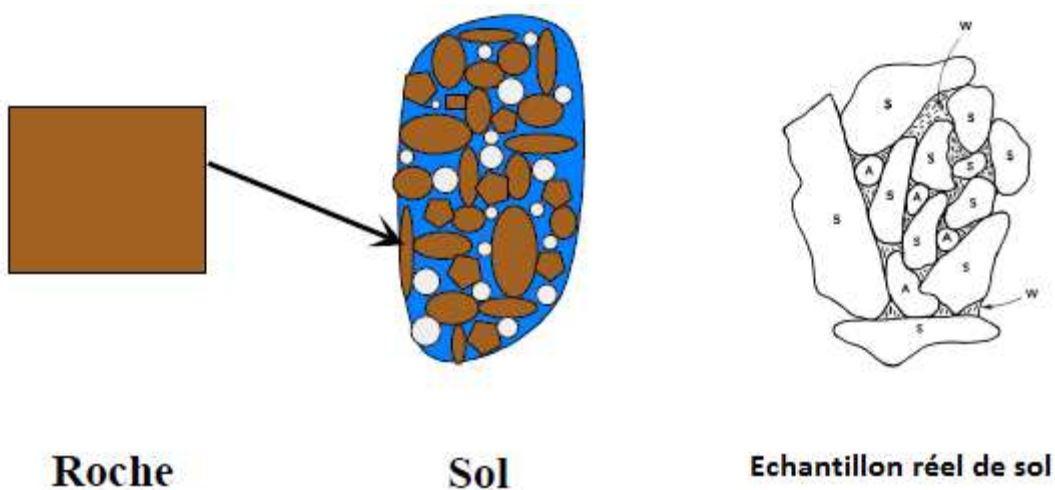
CHAPITRE 2

IDENTIFICATION ET CLASSIFICATION DES SOLS

- INTRODUCTION
- CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE SOL
- CARACTERISTIQUE GRANULOMETRIQUE
- CONSISTANCE DES SOLS
- CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES SOLS

1. Introduction :

De façon générale, on peut dire qu'un sol est constitué d'un ensemble de particules solides entourées de vides. Les particules solides sont des grains minuscules de différents minéraux alors que les vides peuvent être remplis d'eau, d'air et d'eau en proportions variables. Autrement dit, le volume total du sol V_t est la somme du volume des grains solides V_s et du volume des vides V_v .



Le volume des vides est lui-même constitué du volume d'eau V_e et du volume d'air V_a . On peut représenter schématiquement ces trois phases par un diagramme de phases. A gauche, on indique habituellement les volumes occupés par chacune des phases et à droite, les masses correspondantes. Même si l'on ne représente que deux dimensions sur ce diagramme, les volumes y sont exprimés en mètre cube « m^3 ».

On peut mesurer les quantités suivantes : le volume totale V_t , la masse d'eau M_e et la masse des grains solides M_s . on peut ensuite calculer les autres paramètres de même que la relation masse-volume. La plupart de ces relations sont indépendantes de la taille de l'échantillon et sont souvent exprimées sans unités. Elles sont relativement simples et faciles à mémoriser, en particulier si l'on trace le diagramme de phases.

2. Caractéristiques physiques de sol :

Selon la méthode de la représentation pondérale de « Terzaghi » l'échantillon de sol naturel devient :

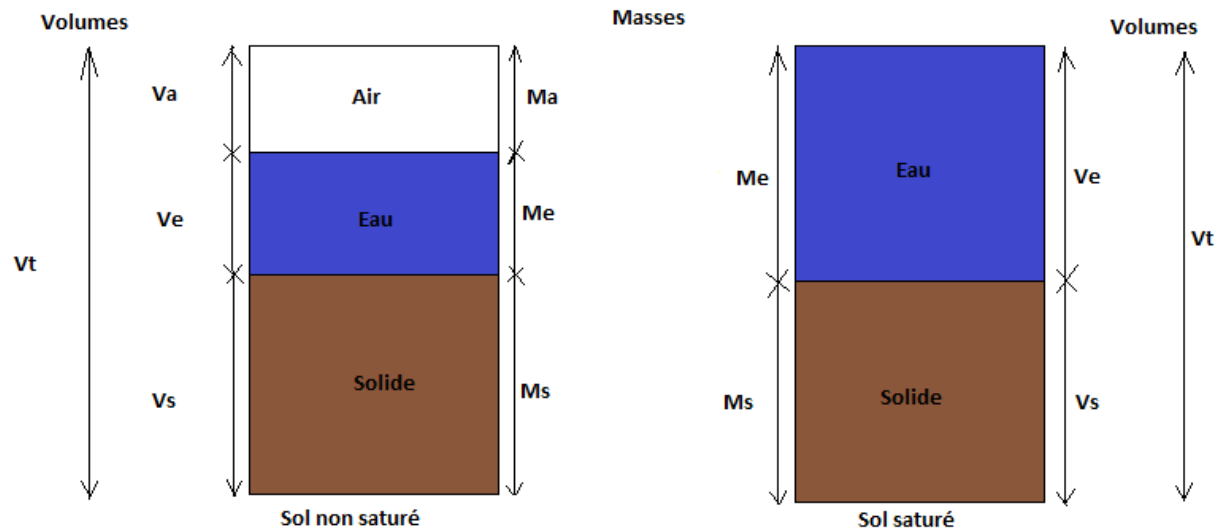


Figure 1 : Représentation pondérale de sol selon Terzaghi.

Les sols sont des compositions de deux ou trois phases. Un sol complètement sec se compose de deux éléments à savoir les particules solides et l'air, il est donc classé comme « sol à deux phases ». Un sol complètement saturé est aussi à deux phases : les particules solides et l'eau sont ses principaux constituants. Cependant, un sol partiellement saturé est formé de particules solides, d'eau et d'air, il est dit alors sol de type à trois phases. Ces différentes compositions sont représentées par un ensemble de diagrammes sur la figure 1. Chacune des trois phases est montrée séparément. Cette forme idéale, présentée par « KARL TERZAGHI » en 1925, permet d'étudier les propriétés physiques de la masse de sol.

- M_{tot} : masse totale ; - M_a : masse de l'air ; - V_e : volume de l'eau ;
- M_s : masse sèche ; - V_v : volume des vides ; - V_{tot} : volume total
- M_e : masse de l'eau ; - V_a : volume de l'air ;

2.1.Masse volumique :

Il y a plusieurs types de la masse volumique selon l'état de sol :

- *Sol humide : masse volumique apparente ou humide*

$$\rho_h = \frac{M_{tot}}{V_{tot}} = \frac{M_e + M_s}{V_s + V_a + V_e}$$

- *Sol sec : masse volumique absolue ou sèche :*

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_{tot}} = \frac{M_s}{V_s + V_a}$$

- *Sol saturé : Masse volumique saturée*

$$\rho_{sat} = \frac{M_s + M_e}{V_s + V_e}$$

- *Sol contient uniquement les grains solides : Masse volumique des grains solides*

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

La valeur de la masse volumique varie en générale entre 2.6 t/m³ et 2.75 t/m³, est couramment pris égal à 2.65 t/m³ pour tous les sols sauf les sols organiques.

Lorsque le sol est saturé donc on peut calculer autre type de la masse volumique qu'on appelé « masse volumique déjàugé » : $\rho' = \rho_{sat} - \rho_e$

Remarque : *on peut définir par ces expressions les poids volumiques :*

$\gamma_h, \gamma_d, \gamma_{sat}, \gamma_s$ et γ' plus les densités d_h, d_d, d_{sat}, d_s et d' .

2.1.1. Détermination de la masse volumique en laboratoire :

Pour déterminer la masse volumique humide il y a trois types d'essai qui détermine cette valeur « méthode par immersion dans l'eau, méthode de la trousse coupante et méthode du moule ».

Méthode par immersion dans l'eau :

Un échantillon de forme simple de masse comprise entre 0,1 et 0,5 kg est pesé (m) puis recouvert d'une couche de paraffine ($\rho_{\text{paraffine}} = 0.88 \text{ g/cm}^3$). Une deuxième pesée (m_p) permet de déterminer la masse de la couche de paraffine et de calculer son volume. Une troisième pesée, h hydrostatique de, l'échantillon recouvert de paraffine (m_p') permet de calculer le volume de l'échantillon recouvert de paraffine. Le volume de paraffine étant connu, on en déduit le volume V de l'échantillon :

$$V = V_{\text{sol+paraffine}} - P_{\text{araffine}} = \frac{m_p - m_p'}{\rho_e} - \frac{m_p - m}{\rho_p}$$

L'échantillon doit être naturel pour réaliser cet essai et n'est pas remanié.

Méthode de la trousse coupante :

On effectue un poinçonnement avec une trousse coupante dans l'échantillon. Les faces de la prise d'essais ont arasées aux extrémités. Le volume V de la prise d'essai est égal au produit de l'aire de la section d'entrée de la trousse coupante par sa hauteur. L'échantillon de sol est légèrement remanié par le passage de la trousse coupante, il est cependant considéré à l'état naturel.

Méthode du moule:

L'échantillon préparé selon un processus défini remplit le moule jusqu'à débordement. L'extrémité supérieure du moule, de dimensions connues, est arasée à la règle. C'est la méthode utilisée dans l'essai proctor (norme NF P 94-093). L'échantillon de sol est remanié

Méthode de pycnomètre pour déterminer la masse volumique des grains solides :

Le problème est de mesurer le volume des grains solides V_s , constituant l'échantillon de sol. Cette mesure est effectuée généralement au pycnomètre (cf g.2). Une masse connue m_s de sol séché par passage à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante est introduite dans un récipient contenant de l'eau distillée. Un agitateur magnétique sépare les particules les unes des autres. Les bulles d'air libérées sont aspirées par un vide d'air (trompe à eau).

Après s'être assuré qu'aucune bulle d'air n'est piégée entre les particules solides, on détermine avec un très grand soin le volume d'eau déplacée par les particules solides. Le volume de la phase solide V_s , égal au volume d'eau déplacée par le sol, est déterminé par pesée.

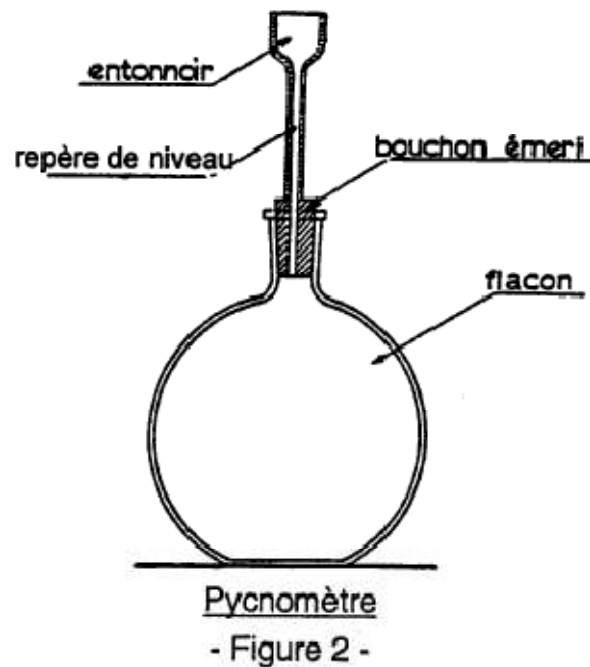
m_1 : masse du pycnomètre contenant l'eau repère de distillée et le barreau magnétique,

m_2 : masse du pycnomètre contenant le sol l'eau distillée et le barreau magnétique.

$$m_2 = m_1 + m_s - (\rho_e \cdot V_s)$$

Avec m_s : masse des particules solides,

$$V_s = \frac{m_1 + m_s - m_2}{\rho_e}$$



2.2. Teneur en eau « w » : quantité de l'eau dans exprimé en %

- Teneur en eau pondérale :

$$w_p = \frac{M_e}{M_{tot}} \times 100$$

- Teneur en eau gravimétrique :

$$w = \frac{M_e}{M_s} \times 100$$

- Teneur en eau de saturation :

$$w_{sat} = \frac{M_{esat}}{M_s} \times 100$$

- Teneur en eau volumique

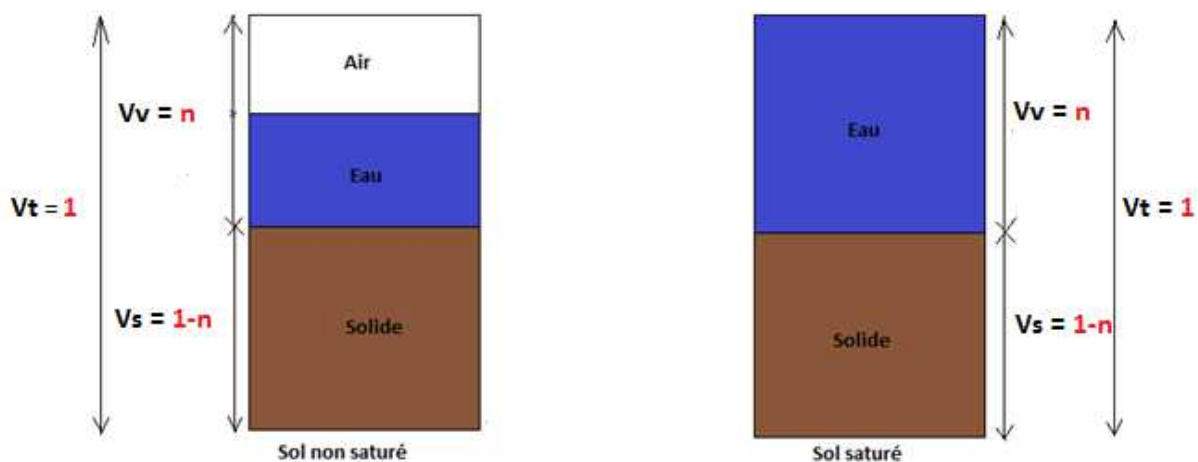
$$w_\theta = \frac{V_e}{V_{tot}} \times 100$$

La teneur en eau le plus utilisé en mécanique de sol est la teneur en eau gravimétrique « w » ; la teneur en eau peut dépasser le 100% (dans le cas des sols organiques).

2.3.Porosité « n »:

La porosité est égale au volume total des vides divisé par le volume total du sol. Elle représente le volume des vides lorsque le volume des vides est supposé égal à 1.

$$n(\%) = \frac{V_v}{V} \times 100$$

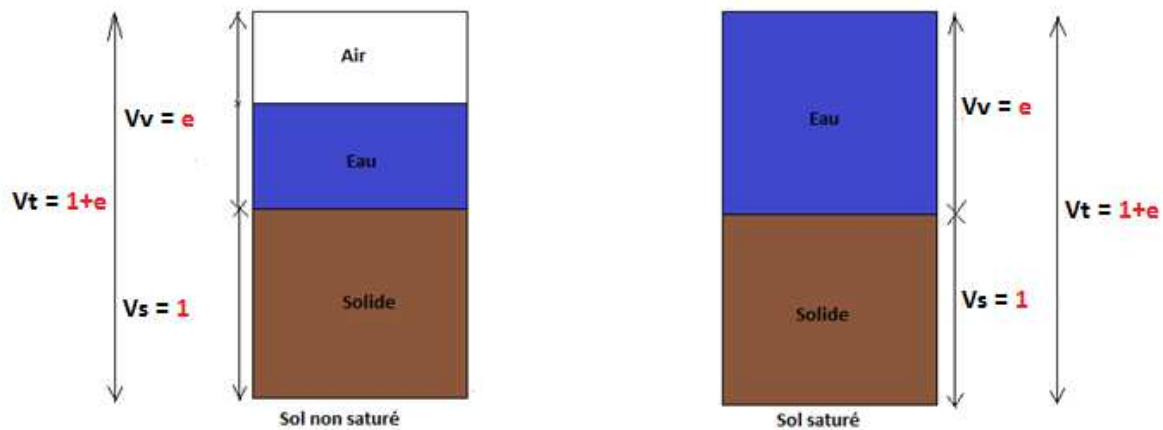


On utilise autre grandeur adimensionnelle qui caractérise les vides dans les sols, appelés « indice des vides 'e' » :

$$e(\%) = \frac{V_v}{V_s} \times 100$$

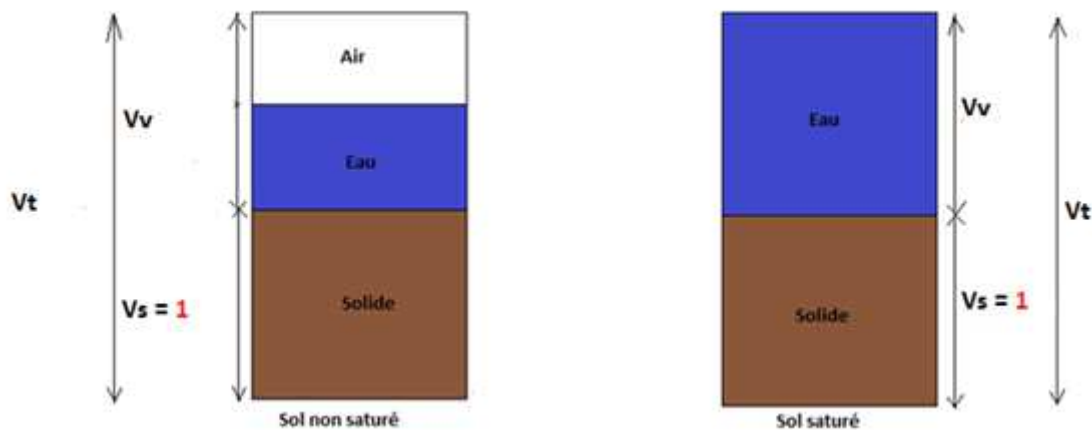
Cet indice représente le volume des vides lorsque le volume des solides est supposé égal à 1, par cette définition, il existe une relation entre « n » et « e » :

$$e = \frac{n}{1-n} \quad \text{et} \quad n = \frac{e}{1+e}$$



2.4. Volume spécifique de l'échantillon « v »:

C'est le volume total de l'échantillon lorsque le volume des grains solides est pris égal à l'unité.



2.5. Degré de saturation « S » :

Il est égal au volume d'eau dans le sol divisé par le volume total des vides. Ce coefficient permet de classer les sols selon leur humidité (Tab3).

$$S(\%) = \frac{V_e}{V_v} \times 100$$

- $S = 0\%$ sol sec
- $S = 100\%$ sol totalement saturé.

2.6. Indice de densité « I_d »

Pour un matériau pulvérulent, la densité joue un rôle essentiel dans son comportement. Outre l'évaluation de la densité absolue d'une couche de sol, à partir du poids volumiques, on est amenés à situer cette densité par rapport aux minimum et maximum. En fait, deux sols ayant le même poids volumique sec, n'ont pas forcément la même densité. On définit pour cela l'indice de densité I_d tel que :

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

Avec e_{\max} : indice des vides maximum (lorsque le poids volumique devient minimum)

e_{\min} : indice des vides minimum (lorsque le poids volumique devient maximum)

on peut écrire aussi I_d en fonction de poids volumique sec comme suit :

$$I_d = \left(\frac{\gamma_d - \gamma_d^{\min}}{\gamma_d^{\max} - \gamma_d^{\min}} \right) \left(\frac{\gamma_d^{\max}}{\gamma_d} \right)$$

Le classement de densité de sol est donné dans le tableau suivant :

I_d (%)	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
Densité	Très lâche	Lâche	Moyen	Dense	Très dense

3. Les relations reliant les différents paramètres du sol :

Selon la méthode de représentation pondérale de l'échantillon de sol on peut établir plusieurs relation entre les paramètres de sol. On prend l'exemple de ces relations :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + w} \quad \text{ou} \quad \gamma_d = \frac{\gamma_{\text{sat}}}{1 + w_{\text{sat}}}$$

$$w_{\text{sat}} = \gamma_e \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right) \quad \text{ou} \quad \gamma' = \gamma_e \left(1 - \frac{\gamma_e}{\gamma_s} \right)$$

$$S = \frac{w}{w_{\text{sat}}} \quad ; \quad e = \frac{w \gamma_s}{s \gamma_e} \quad ; \quad \gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + e}$$

Remarque :

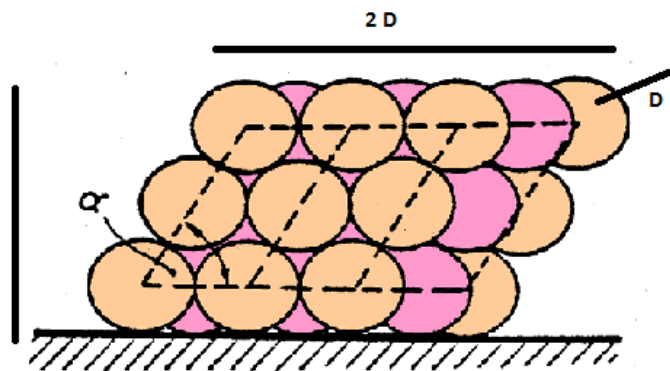
- Il suffit de connaître 3 paramètres pour calculer les autres paramètres ;

- Si le sol saturé donc il suffit de connaître 2 paramètres pour calculer les autres paramètres.

4. Arrangement des grains solides :

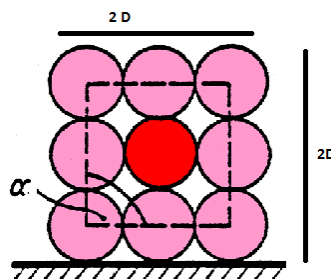
Diverses études théoriques ont été entreprises pour trouver l'arrangement idéal des grains qui donne le maximum de densité. La position donnant une densité maximale est obtenue lorsque chaque couche remplit les vides de la couche sous-jacente ; les centres de sphères forment ainsi un rhomboèdre avec un pourcentage des vides.

- Forme rhomboèdre :



- Forme cubique

La position donnant une densité minimale est celle où les sphères sont posées les unes au-dessus des autres les centres de sphères forme ainsi une cube.



5. Caractéristique granulométriques :

5.1.Introduction :

*L'objectif de déterminer les caractéristiques granulométriques du sol est de déterminer la distribution dimensionnelle des grains de sols. Le sol est caractérisé du point de vue granulaire par la classe granulométrique « d/D » ; Le premier désigne le diamètre minimum des grains « **d** » et le deuxième le diamètre maximum « **D** ».*

L'intérêt de déterminer ses caractéristiques en géo-technologie et construction est donné dans ces points :

- ✓ *Choix du sol pour la construction des chaussées et barrages en terre;*
- ✓ *Choix matériau pour les fondations;*
- ✓ *Drainage des eaux souterraines;*
- ✓ *Traitement des sols;*
- ✓ *Compactage dynamique des sols;*
- ✓ *Préparation du béton;*
- ✓ *Renforcement des sols.*

Pour déterminer les caractéristiques granulométriques, il faut réaliser des essais en laboratoire appelées analyse granulométrique. Il est aussi appelé : Distribution des particules de sol « D.I.P » ou analyse mécanique « A.M ».

Lorsque les particules de sol est supérieur à 0,08 mm on réalise des essais granulométriques par tamisage, si non, on réalise un autre essai appelé analyse granulométrique par sédimentation.

5.2.Analyse granulométrique par tamisage :

Ce sont les tamis et les passoirs qui sont utilisés pour effectuer cet essai. Par définition un tamis comporte des mailles carrées constitués par des fils qui se croisent et une passoire comporte des trous ronds pratiqués dans une tôle. Il y a plusieurs séries de tamis et passoire à la disposition des laboratoires de géotechnique de nos jours :

- ✓ *La série française dite « AFNOR » ;*
- ✓ *La série britannique dite « BS » ;*
- ✓ *La série américaine dite série « ASTM ».*

OUVERTURES DES TAMIS ET PASSOIRES				
ASTM		BS	AFNOR	
N°	TAMIS	PASSOIRES/TAMIS	PASSOIRES	TAMIS
3	6,350	50,000	5,000	63,000
4	4,760	37,500	4,000	50,000
6	3,360	28,000	3,150	40,000
8	2,380	20,000	2,500	31,500
10	2,000	14,000	2,000	25,000
16	1,190	10,000	1,600	20,000
20	0,840	6,300	1,250	16,000
30	0,590	5,000	0,800	12,500
40	0,420	3,350	0,630	10,000
50	0,297	2,000	0,500	8,000
60	0,250	1,180	0,400	6,300
70	0,210	0,060	0,315	5,000
100	0,149	0,043	0,250	-
140	0,105	0,030	0,200	-
200	0,074	0,021	0,160	-
270	0,053	0,015	0,125	-
400	0.037	0.0063	0,100	-
-	-	-	0,080	

Tab 5 : ouverture des tamis et passoires les plus utilisés.

Cette analyse est utilisée pour les sols dont des particules ont une dimension supérieure à 0,08mm comme les graviers et sables gros. L'opération consiste à mettre l'échantillon dans une étuve à une température de 105° - 110°C puis le peser afin d'obtenir sa masse sèche. Le sol est ensuite passé à travers une série de tamis ayant successivement des mailles plus petites. Le poids du sol retenu dans chaque tamis est déterminé et le pourcentage cumulé passant les tamis calculés. Le tamisage à sec n'est précis que pour les matériaux dénués de cohésion c'est-à-dire seulement pour les sables ou les graviers. Dans le cas d'un sol limoneux ou argileux le tamisage est effectué sous l'eau utilisant des agents chimiques pour dissocier les grains de sol « défloculant » (Fig1).

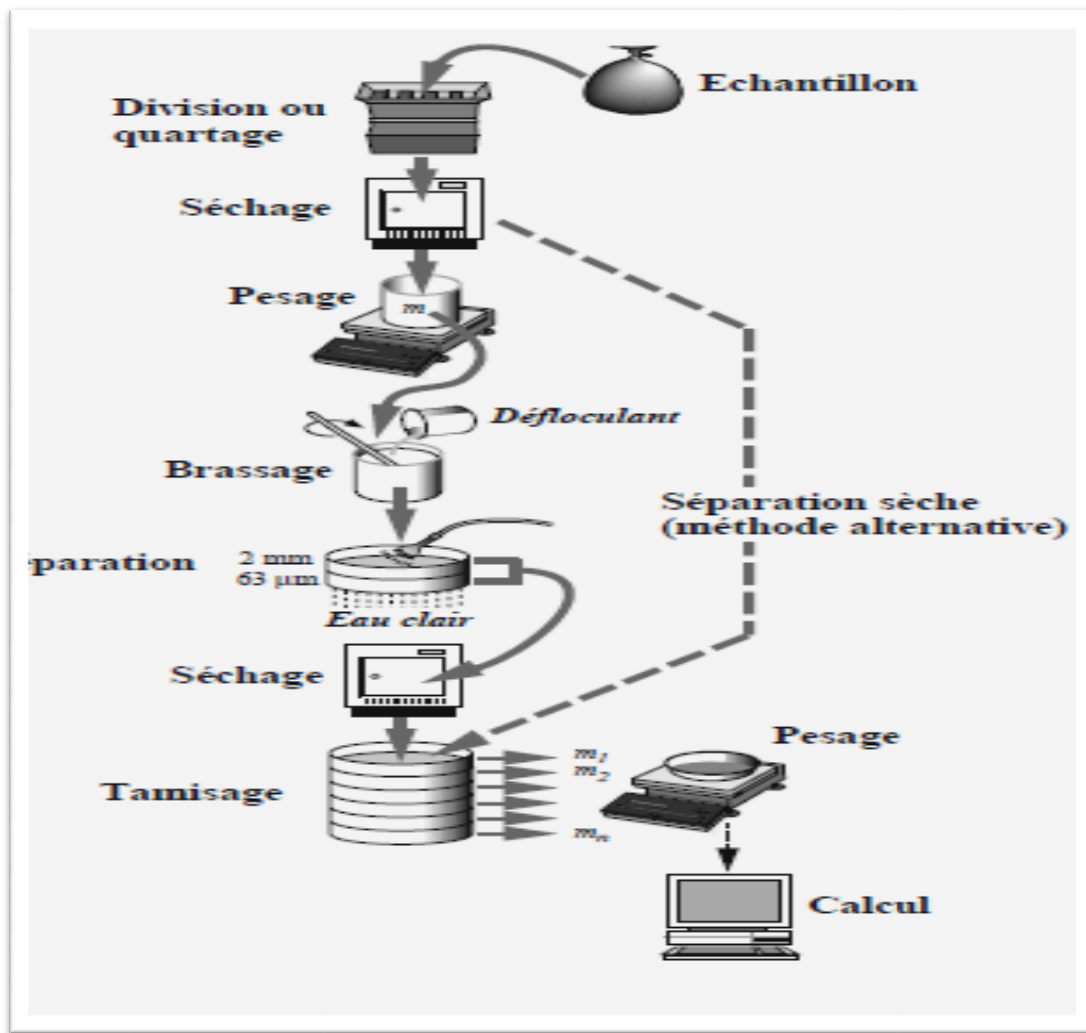


Fig 3 : étapes effectuées pour l'analyse granulométrique par tamisage.

5.3. Granulométrie par sédimentation « Sédimentométrie » :

Cette analyse est utilisée pour les sols dont des particules ont une dimension inférieure à 0,08 mm comme les argiles et les limons. Une pipette spéciale de 125 ml est utilisée pour obtenir des échantillons de sol à partir d'une suspension dans l'eau. Ces cultures sont prises à des intervalles de temps bien définies.

L'hydromètre est aussi un moyen utilisé pour mesurer la densité de cette suspension de sol. A partir de ces mesures, la distribution des particules de limon peut être évaluée. Cette technique ne soit pas aussi exacte que celle de la pipette elle peut toutefois donner des résultats suffisamment bons pour la majorité des problèmes de génie civil.

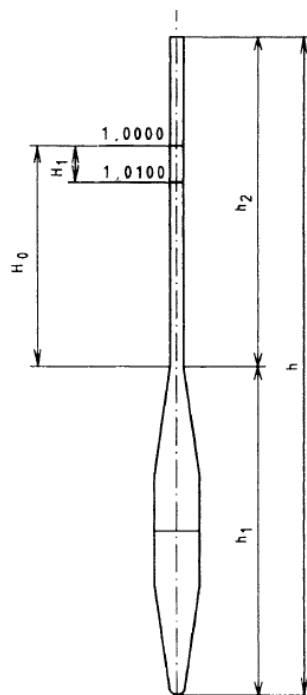


Figure 4. L'hydromètre (densimètre).

Les opérations décrites ci-dessous sont successivement à réaliser dans une salle d'essai dont la température doit être contrôlée. Le tamisât, au tamis de 80 μm , de l'échantillon de sol, préparé selon la NF P 94-056, est recueilli avec son eau de lavage dans un bac, le tout est mis à décanter. Une fois redevenue claire, l'eau du bac est siphonnée sans entrainer d'éléments fins.

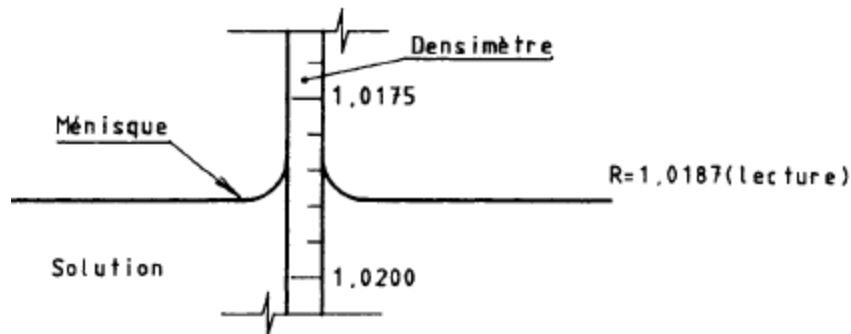
Le bac et son contenu sont ensuite placés dans une étuve. Conventionnellement, l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse du matériau contenu dans le bac ne varie pas de plus de 2/1000 entre deux pesées successives effectuées immédiatement après la sortie de l'étuve.

Sur le tamisât séché, désagréé avec le pilon dans le mortier puis homogénéisé, prélever une prise d'essai de 80g (+ ou moins 10g).

Introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique, ajouter 500 cm^3 du mélange spéciale et garder à la température ambiante. Laisser imbiber pendant au moins 15 h à la température ambiante. La prise d'essai est dispersée dans la solution d'eau est de défloculant au moyen de l'agitateur mécanique qui doit fonctionner pendant 3min minimum à 10000 tr/min.

Verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après la fin de l'agitation, compléter par de l'eau distillée jusqu'à 2000 cm³. Verser 2000 cm³ de la même eau distillée dans une seconde éprouvette témoin et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propre.

Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre ; faire les lectures depuis le début de l'essai aussi longtemps que nécessaire, aux temps suivants : 0.5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 40 ; 80 ; 240 ; 1440 minute. Faire les lectures du densimètre au sommet du ménisque. À partir de 5mn plonger le densimètre avec précaution dans la solution au minimum 30 s avant la mesure.



Le pourcentage d'éléments inférieur ou égaux à D contenus dans la suspension au temps « t » est calculé comme suit :

$$\rho = \frac{V_s}{m} \times \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_e} \times \rho_e \left[\frac{\rho_t}{\rho_e} - 1 \right]$$

V_s : volume de la suspension ;

m : la masse de sol sec prélevée ;

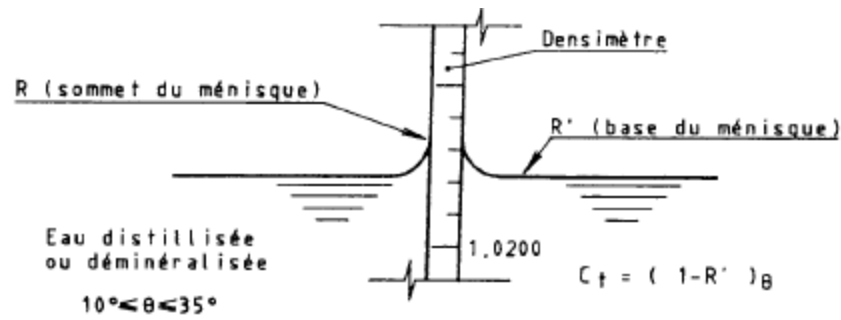
ρ_t : masse volumique de la suspension au temps « t »

$$\rho_t = R_c \times \rho_e = (R + C_m + C_t + C_d)\rho_e$$

R_c : lecture corrigée du densimètre à l'instant « t »

R : lecture du densimètre (sommet de ménisque) à l'instant « t »

C_m : correction due au ménisque $C_m = n^{-1} \sum_{i=1}^{i=n} (R - R')_i$



C_t : correction due aux variations de température en cours d'essai $C_t = 1 - R'$

C_d : correction due aux défloculant $C_d = R_1 - R_2$ (avec R_1 lecture de ménisque à l'éprouvette de l'eau et $R_2 = R$ au même temps)

N : nombre des mesures effectuées.

De la formule de Stokes, le plus large diamètre des particules solides en suspension dans l'eau à un temps « t » est déduit :

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{(\gamma_s - \gamma_e)}} \sqrt{\frac{H_t}{t}}$$

η : la viscosité dynamique de la solution à l'instant « t »

$$\eta = \frac{0.00179}{1 + 0.03368 t + 0.00022 t^2}$$

H_t : profondeur effective du centre de poussée du densimètre à l'instant « t »

$$H_t = H - [100 H_1 (R + C_m - 1)] - H_c$$

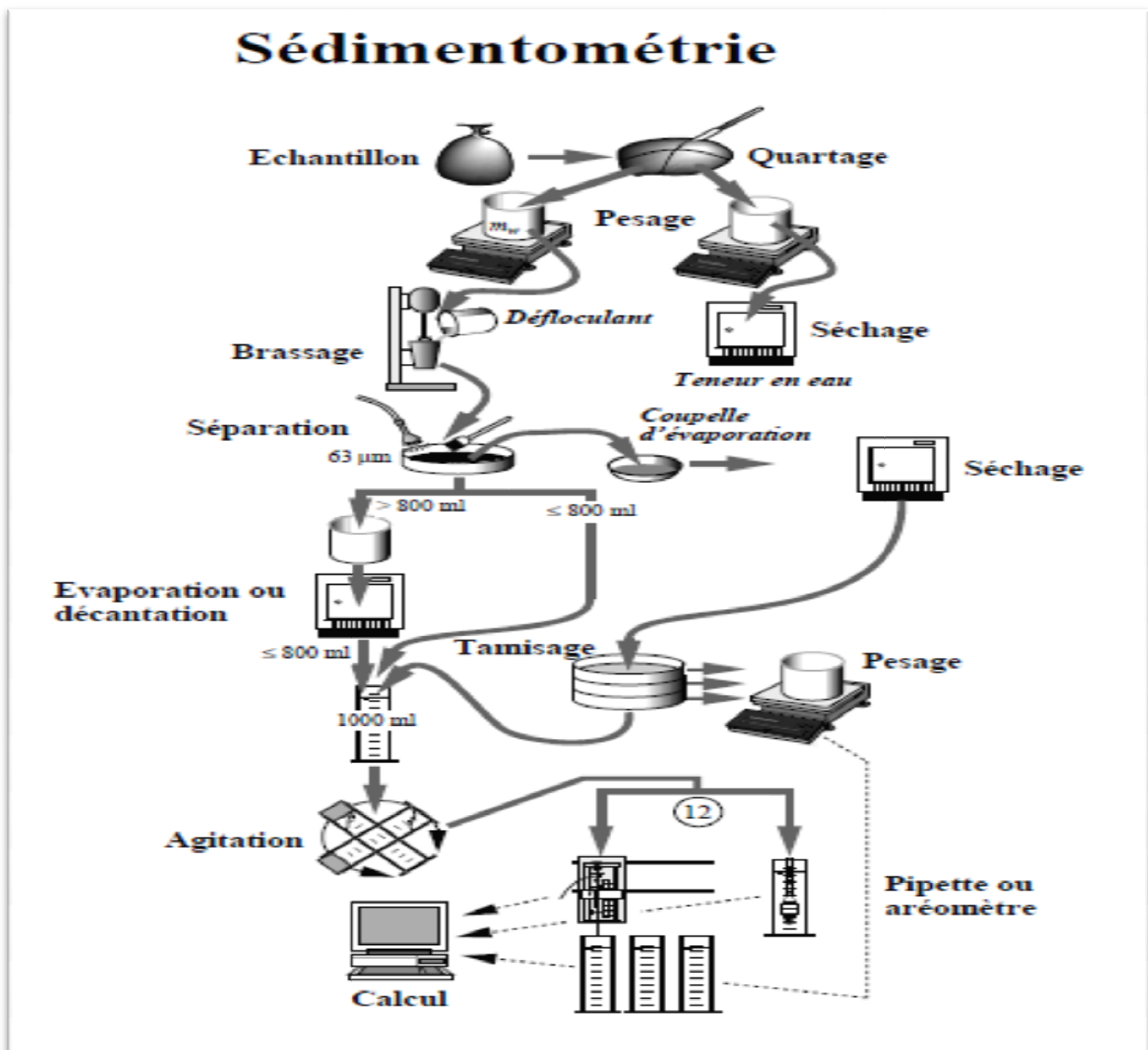
H_c le déplacement du niveau de la solution lié à l'introduction de densimètre dans l'éprouvette d'essai (Pour calculer H , h et h_1 voir la figure n 4)

$H_c = 0.5 \frac{V_d}{A}$ avec V_d volume de densimètre et « A » la section droite de l'éprouvette d'essai.

t : temps.

Les particules de sol ayant un diamètre plus grand que D calculé descendent plus bas que la zone de mesure. Ainsi, avec des lectures à l'hydromètre prises à des intervalles de temps

variés, le pourcentage des particules plus fines peut être calculé et leur distribution représentée.



5.4.Courbe Granulométrique :

En utilisant l'une ou les méthodes de laboratoire citées précédemment, une courbe représentant les résultats obtenus peut être dessinée (fig2). Cette courbe granulométrique donne pour chaque diamètre, le poids des particules de cette taille ou de taille inférieure. Le poids est indiqué en % du poids total de la matière sèche de l'échantillon. La courbe est dressée sur un repère ordonné logarithmique.

Donc pour construire la courbe granulométrique il faut mesurer:

- ✓ **REFUS**: la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis. (en %)

✓ **TAMISAT** (ou **Passant**) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis. (en %)

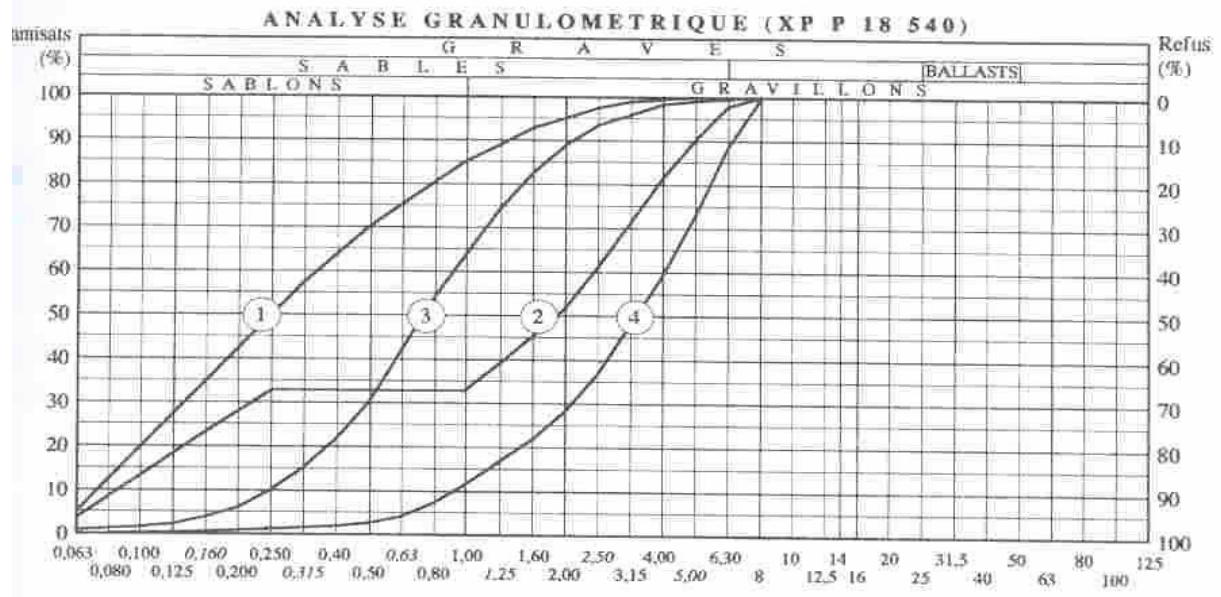


Fig2 : courbe granulométrique.

La forme générale et la pente de la courbe peuvent être décrites en fonction du coefficient d'uniformité « C_u » dit aussi coefficient de Hazen, 1930 ou bien le facteur de pente (coefficient de courbature) « C_c ».

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

- D_{60} : Diamètre correspondant à 60% (tamisât) ;
- D_{10} : Diamètre correspondant à 10% (tamisât), Il est appelé aussi « diamètre efficace ».

Tab6 : Description de sol en fonction du coefficient d'uniformité.

C_u	Description de courbe
≤ 2	granulométrie uniforme
> 2	granulométrie étalée

Le coefficient de courbature, il est donné par la relation suivante :

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

Les sols sont mal gradués lorsqu'on a:

- Granulométrie uniforme : grains à peu près de mêmes dimensions
- Granulométrie discontinue: pas de grains dans certains intervalles de dimension.

<i>C_c</i>	<i>Description de courbe</i>
1-3 avec <i>C_u</i> <4	Gravier bien gradué
1-3 avec <i>C_u</i> >6	Sable bien gradué

Les deux figures (fig3 et fig4) ci-dessous, présentent deux exemples sur la courbe granulométrique, lorsqu'on réalise un essai granulométrique par tamisage ou par sédimentation.

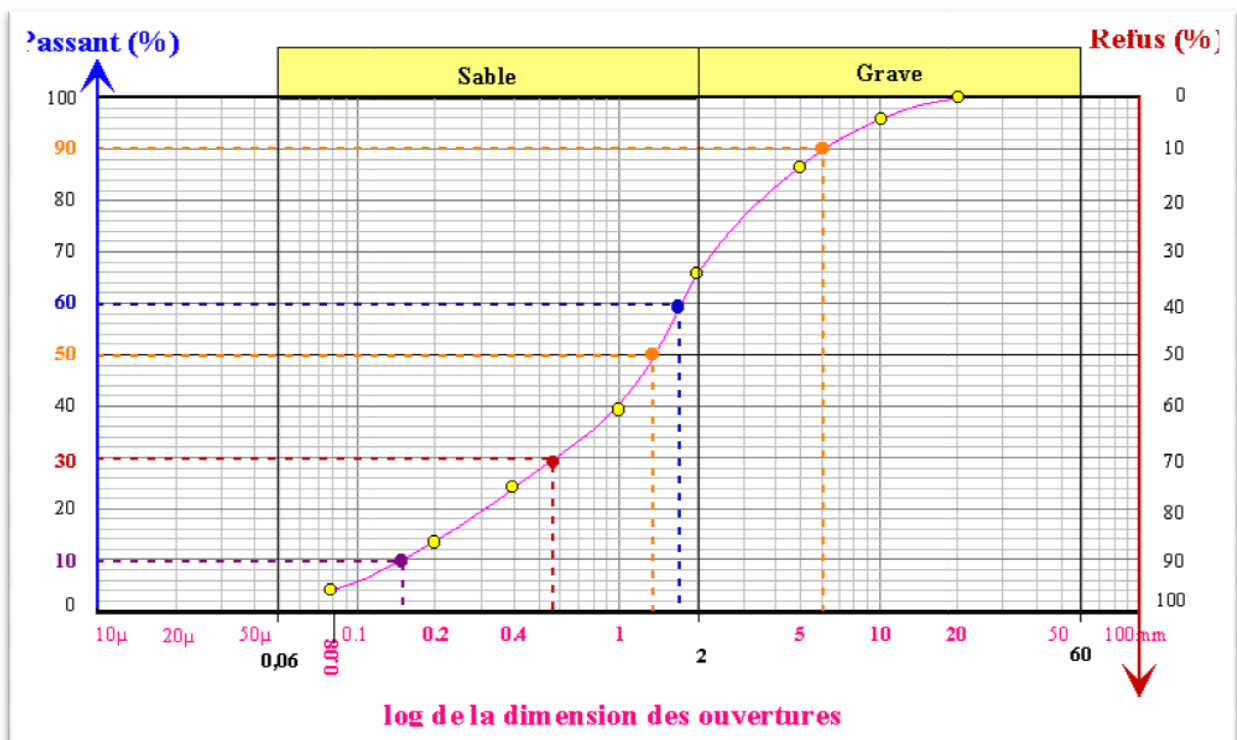


Fig3 : courbe granulométrique des particules >0,08mm

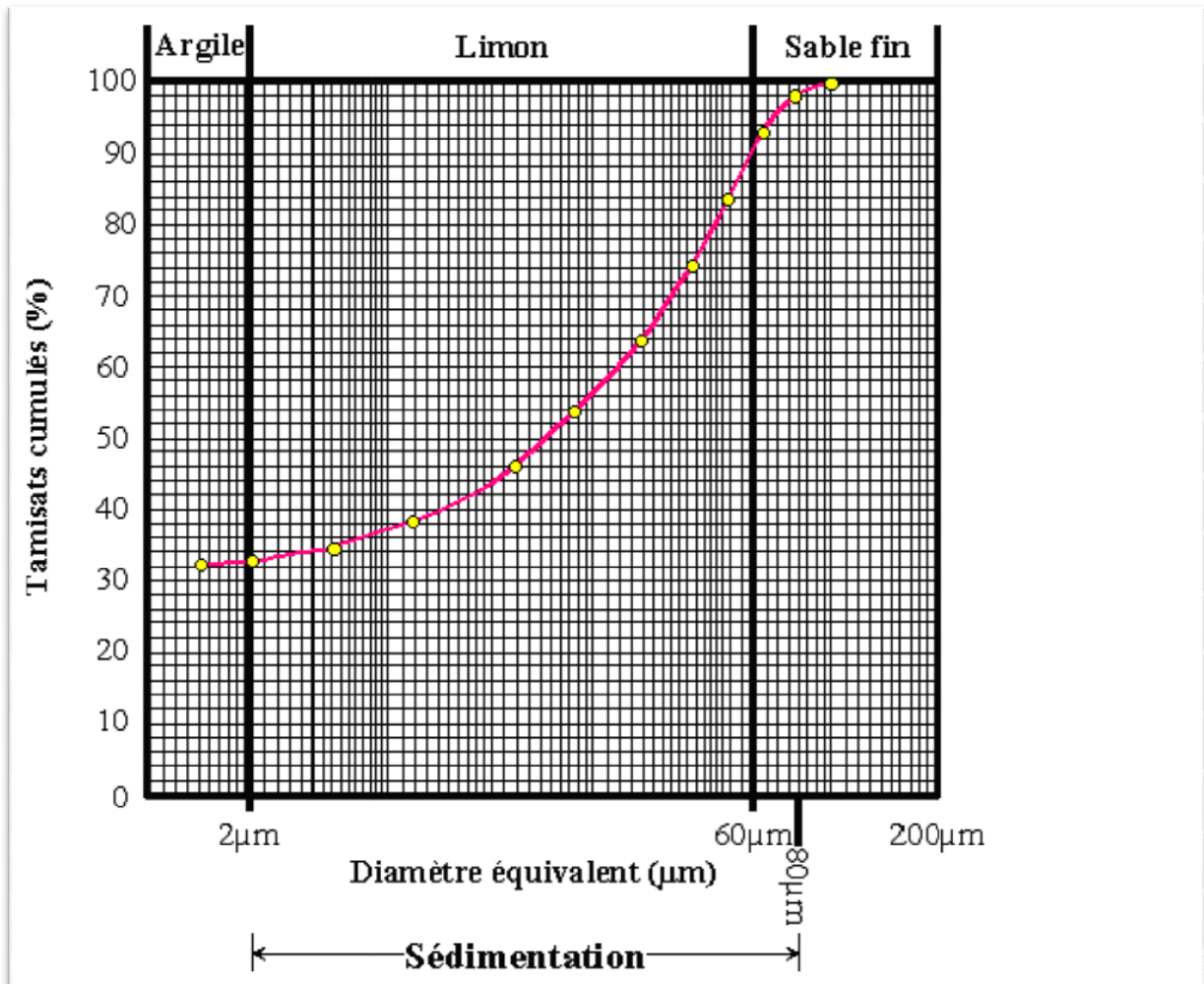


Fig4 : courbe granulométrique des particules <0,08mm

6. Consistance des sols :

6.1. Introduction :

Les argiles sont des pâtes où chaque grain est relié au grain voisin par des forces de cohésion dues à la présence de couche d'eau adsorbée. En fonction de la teneur en eau dans le sol. Quatre états de consistance des argiles ont été définis :

- ✓ **Etat liquide** : l'argile baigne dans l'eau et se comporte comme un liquide visqueux.
- ✓ **Etat plastique** : l'argile peut subir des déformations à volume constant sans engendrer de fissures.
- ✓ **Etat semi-solide** : l'argile développe de petites fissures au cours des déformations, celles-ci sont dues à l'augmentation de sa rigidité.
- ✓ **Etat solide** : les grains constituant le sol ont de grandes forces de frottement entre eux d'où une grande rigidité de l'argile.

6.2. Limites d'Atterberg:

Le passage d'un état phase à un autre n'est pas visible à l'œil nu, il se produit graduellement. Néanmoins, trois limites ont été établies empiriquement et sont universellement appelées « limite d'Atterberg » 1911, ces limites sont :

- ✓ **La limite de liquidité w_L ou L_L** (teneur en eau pondérale) sépare l'état liquide de l'état plastique ;
- ✓ **La limite de plasticité w_p ou L_p** (teneur en eau pondérale) sépare l'état plastique de l'état solide ;
- ✓ **La limite de retrait w_r ou L_r** est la teneur en eau pondérale au-dessous de laquelle le volume de l'échantillon ne varie plus.

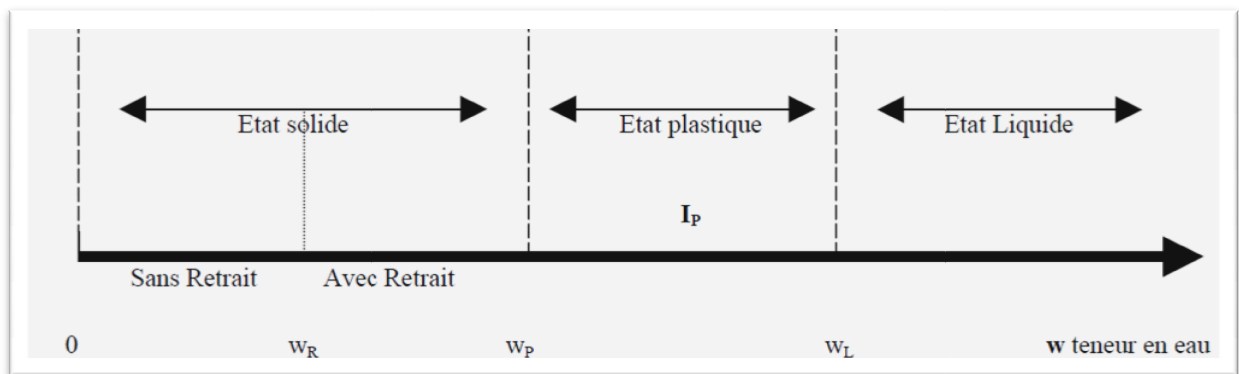


Fig4 : Les phases et les limites d'Atterberg.

L'intervalle de teneur en eau à laquelle le sol est dit en état plastique est défini comme étant l'indice de plasticité :

$$I_p = L_L - L_p$$

Cet indice est d'une grande utilité pour la détermination du type d'argile comme spécifié sur le tableau 7, pour les sols sableux et graveleux n'ont pas de phase de plasticité d'où leur indice de plasticité égal à zéro ($I_p = 0$).

< 12	Non plastique
12-25	Peu plastique
25-40	plastique
> 40	Très plastique

Tab 7 : Type d'argile en fonction de l'indice de plasticité.

6.3.Consistance des argiles :

La teneur en est un paramètre insuffisant pour définir l'état de consistance des argiles, celui-ci doit être fait en reliant la teneur en eau à ces limites de liquidité et de plasticité comme suggéré par Terzaghi et Lambe :

$$I_c = \frac{L_L - w}{I_p} \quad \text{avec: } I_c \text{ consistance relative des argiles}$$

liquide	Très molle	Molle	ferme	Très ferme	Dense
<0	0 - 0.25	0.25 – 0.5	0.5 – 0.75	0.75 - 1	> 1

6.4.Activité des argiles :

Les limites d'Atterberg sont fonctions des dimensions des grains et de la composition minéralogique du sol. Pour une argile contenant des particules solides assez grosses, Skempton a montré que l'indice de plasticité dépend de la quantité de grains solides de dimensions inférieures ou égales à 0,002mm :

$$A_c = \frac{\text{indice de plasticité}}{\% \text{ elements inferieur à } 0,002\text{mm}}$$

A_c est défini comme étant l'activité colloïdale du sol. A titre indicatif le tableau 9 donne l'indice de plasticité, l'indice de liquidité et l'activité pour différents type d'argiles.

Ac	Désignation
< 0.75	Argile inactive
0.75 – 1.25	Argile normale
> 1.25	Argile active

Tab 9 : Activité des argiles.

6.5.Mesure des limites d'Atterberg :

✚ La limite de liquidité w_L ou L_L

La limite de liquidité est déterminée en laboratoire à l'aide de l'appareil de Casagrande 1932, selon la norme française « NF P 94-051 ». Une portion d'argile est placée sur une coupelle est ensuite soumise à un instrument en forme de « V » (fig 5).

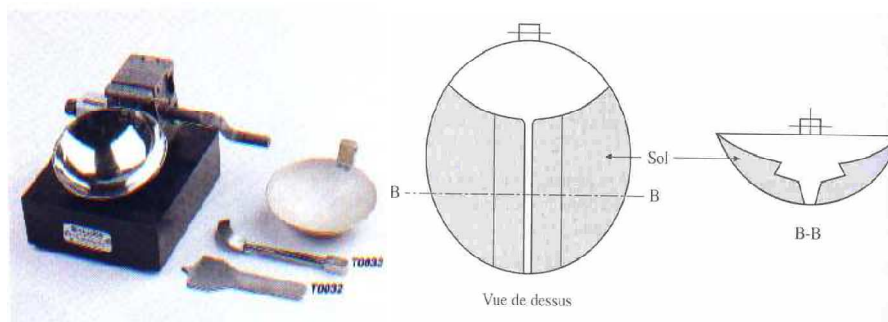


Fig 5 : Coupelle de Casagrande.

La coupelle est ensuite soumise un certain nombre de coups pour fermer la rainure sur environ un centimètre. La teneur en eau de l'échantillon du sol est ensuite déterminée. Le même essai est répété au minimum 4 fois avec différentes valeurs de teneur en eau.

Les résultats de l'essai sont ensuite représentés sur des graphes (fig6). Par définition la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture de 25 coups. Elle peut être aussi donnée par la formule approchée de Skempton :

$$L_L = w \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

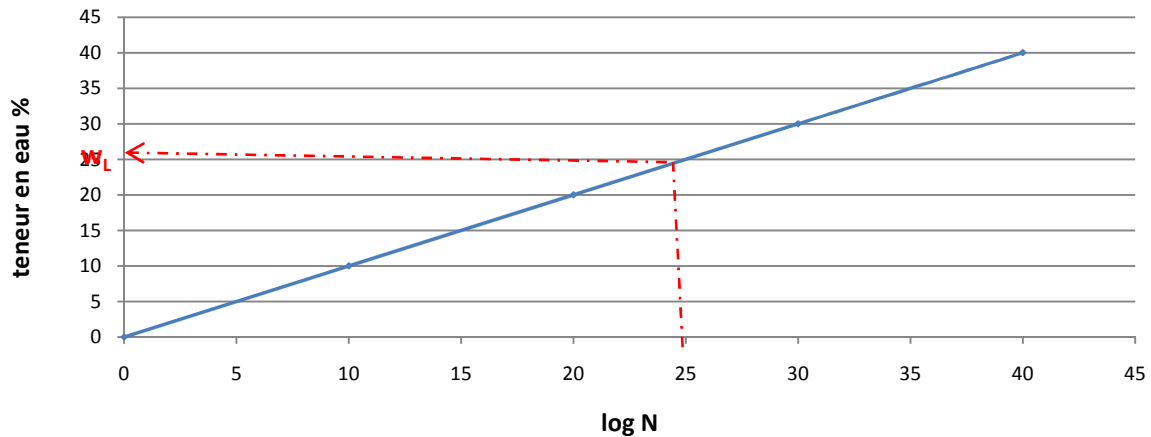


Fig 6 : Résultats types de l'essai de plasticité à la coupelle de Gasagrande.

La limite de liquidité peut être aussi déterminée par l'essai au cône de pénétration selon la norme française « NF P 94-052-1 » (fig7). Le cône d'une masse bien définie est laissé tomber en chute libre sur le sol ayant une teneur en eau « w », sa pénétration est par la suite mesurée. L'essai est répété sur d'autres échantillons du même sol ayant des teneurs en eau différentes.



Fig 7 : cône de pénétration.

Il est recommandé de faire un nombre de quarts tests pour obtenir un résultat fiable, les résultats obtenus sont présentés sur la figure 8.

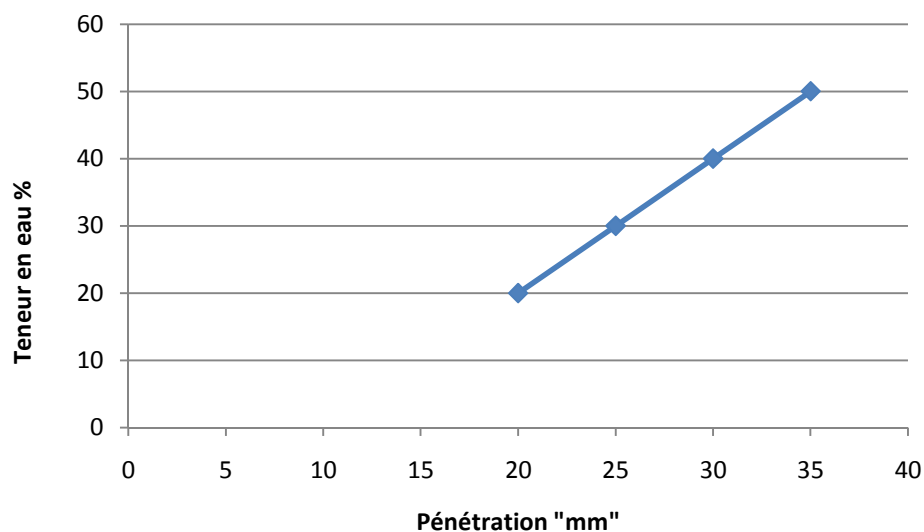


Fig8 : Résultats types de l'essai de plasticité du cône de Pénétration.

La limite de plasticité wp ou Lp :

Elle est mesurée par la pénétration d'un fuseau de sol qui sera aminci progressivement. La limite de plasticité « Lp » est la teneur en eau en % du fuseau qui se brise en tronçon de 1 à 2 cm de long au moment où le diamètre atteint 3mm. Ce type d'essai est très difficile à réaliser et exige beaucoup d'expérience. Par conséquent, pour un même sol il est recommandé de refaire l'essai au minimum 03 fois.

La limite de retrait wr ou Lr :

Elle est la teneur en eau au-dessous de laquelle le volume de l'échantillon de sol cesse de diminuer. Sa valeur est obtenue au laboratoire par dessiccation à l'étuve et la mesure du volume de l'échantillon dans un vase rempli de mercure.

Au dessus de la limite de retrait l'eau remplit les pores et sépare les particules solides. Au dessous, les particules solides sont en contact et l'air pénètre dans les pores. Il se produit alors les fissures.

De même si le sol sec est humidifié, il gonfle lorsque la quantité d'eau absorbée dépasse la limite de retrait. Cette augmentation de volume engendre un gonflement de sol lequel est très néfaste pour les constructions.

7. Classification géotechnique :

Les sols se divisent en plusieurs catégories selon les dimensions des particules les plus dominantes dans l'échantillon. Ils sont désignés par le nom de la portion prédominante qualifiée par un adjectif aux portions secondaires comme les argiles sableuses, les sables limoneux ou les sables argileux. De nombreuses classifications des sols ont été proposées dans différents codes. Parmi les classifications, les plus répandues :

7.1. Classification d'Atterberg

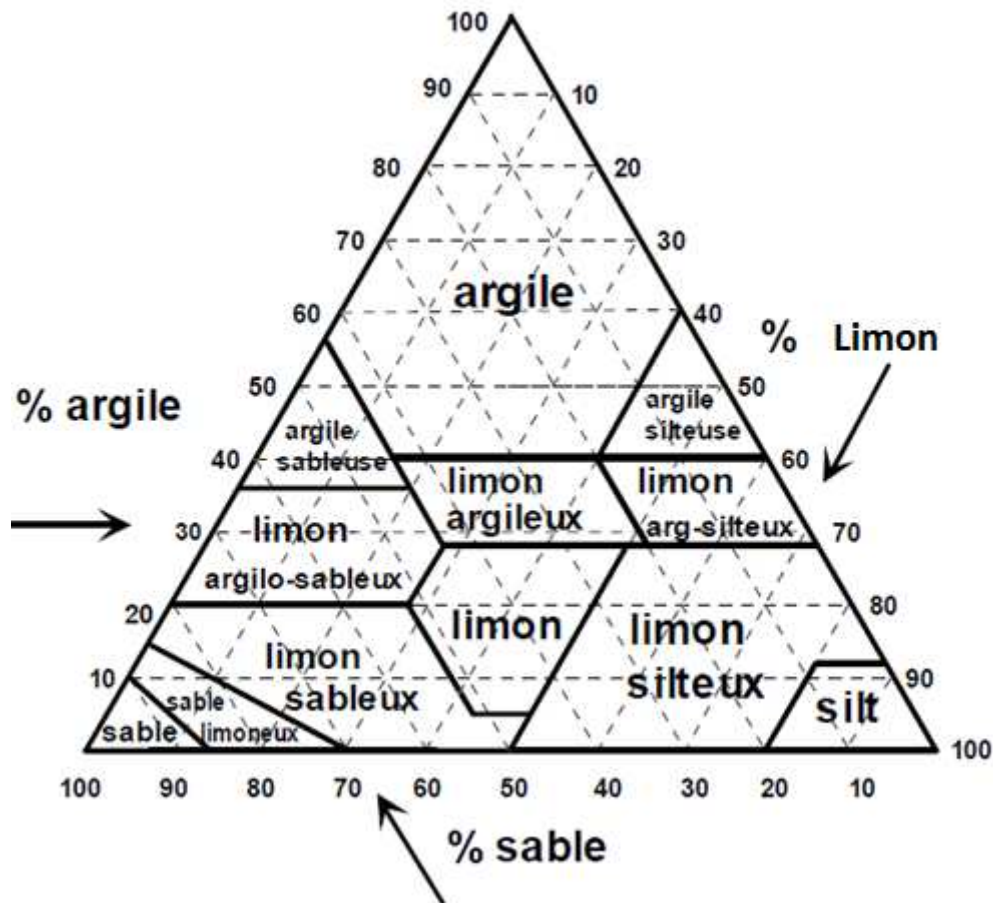
Sol	Dimensions
Enrochement	Supérieur à 200mm
Cailloux	200 mm – 20 mm
Gravier	20 mm – 2 mm
Sable gros	2 mm – 0,2 mm
Sable fin	0,2 mm - 0,02 mm

<i>limon</i>	<i>0,02 mm – 0,002 mm</i>
<i>Argile</i>	<i>0,002 mm – 0,0002 mm</i>
<i>Ultra argile</i>	<i>< 0,0002 mm</i>

Tab : classification d'après Atterberg.

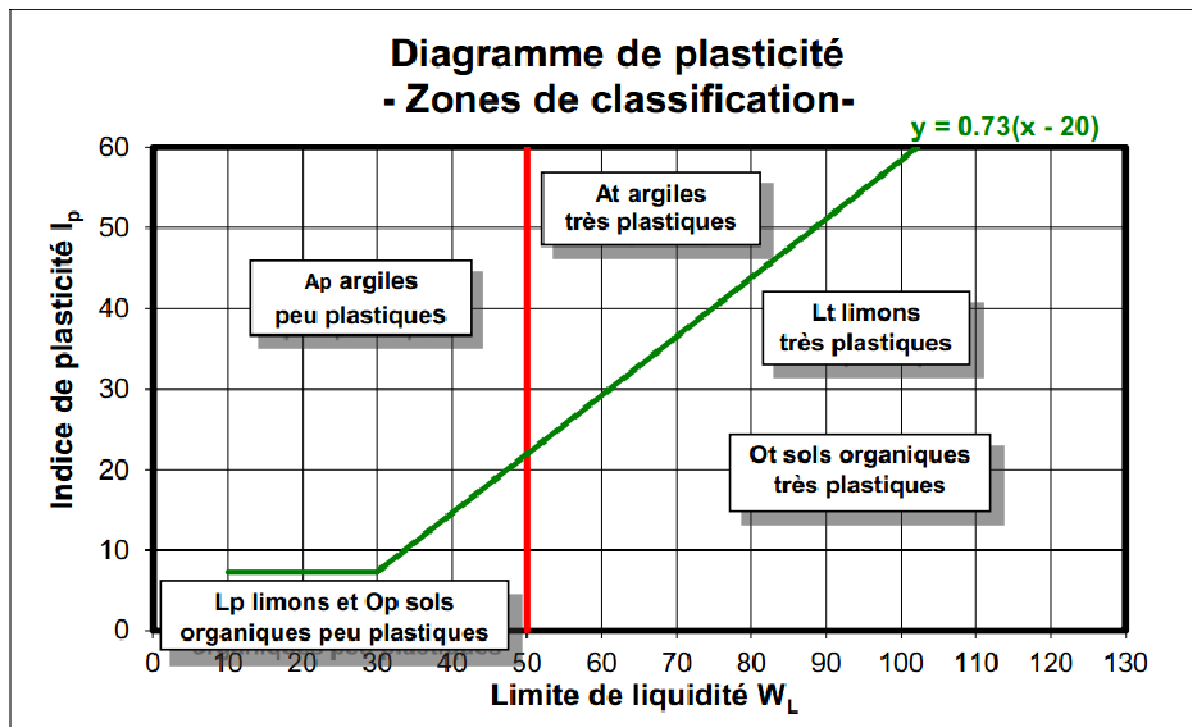
- *Abaque Casagrande :*

La classification basée sur la granulométrie convient uniquement pour les graviers et les sables. Elle est insuffisante pour les argiles et limons dont les propriétés dépendent beaucoup de leur composition minéralogique.



Abaque1 : classification triangulaire des sols.

Les limites de liquidité et de plasticité sont meilleurs paramètres permettant d'identifier et de classer physiquement les sols à particules très fine. Une classification tenant compte de ces paramètres a été présentée par Casagrande abaque2. Prend l'une des appellations et désigné par l'un des symboles ci-après :



7.2. Classification d'après « Public Raod Admininistration :

<i>Sol</i>	<i>Limite de liquidité</i>	<i>Indice de plasticité</i>
<i>Sable</i>	$L_L < 35$	$15 < I_p$
<i>Limon</i>	$20 < L_L < 60$	$5 < I_p < 25$
<i>Argile</i>	$30 < L_L$	$15 < I_p$

Tab : Classification d'après « Public Raod Admininistration.

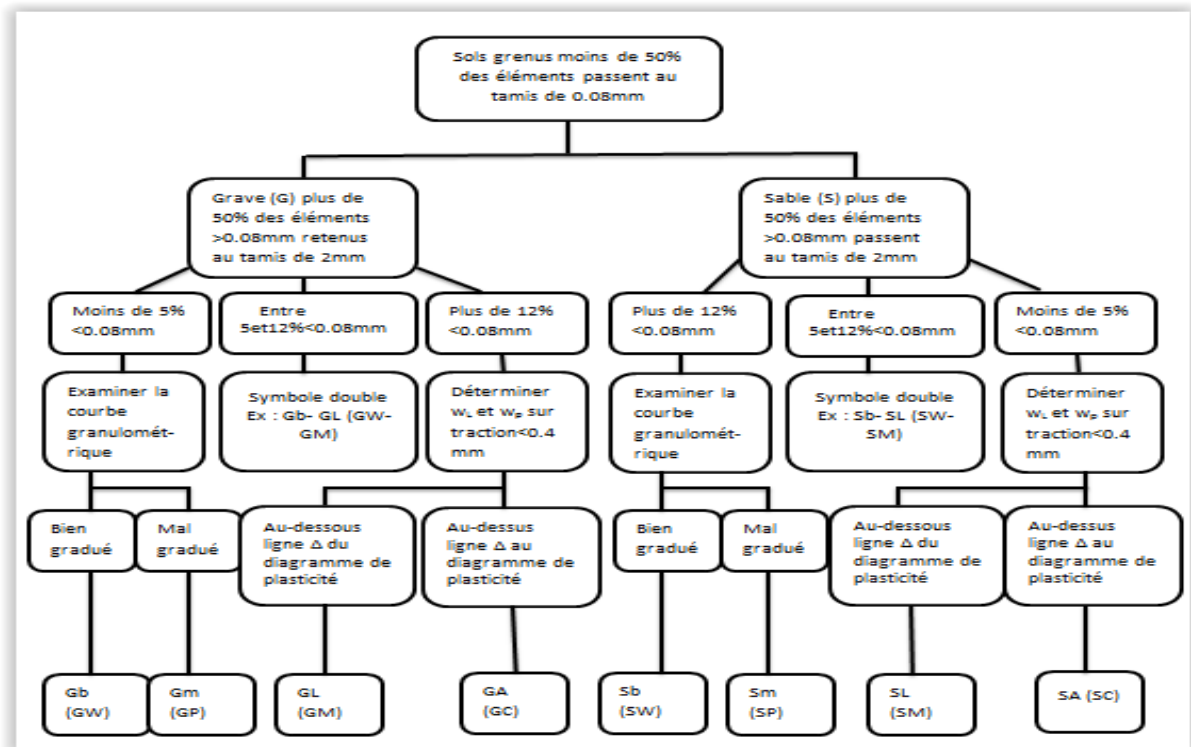
7.3. Classification d'après LCPC :

Elle est adaptée de la classification U.S.C.S (Etats-Unis) est donnée à titre indicatif, elle n'est pas normalisée et n'a pas d'application particulière. Elle est basée d'une part sur l'analyse granulométrique pour les sols à matrice grossière et d'autre part sur les limites d'Atterberg pour les sols à matrice fine ou pour la partie fine des sols grenus. La classification française proposé par le LCPC s'inspire de la classification USCS et ne diffère d'elle que dans certains détails.

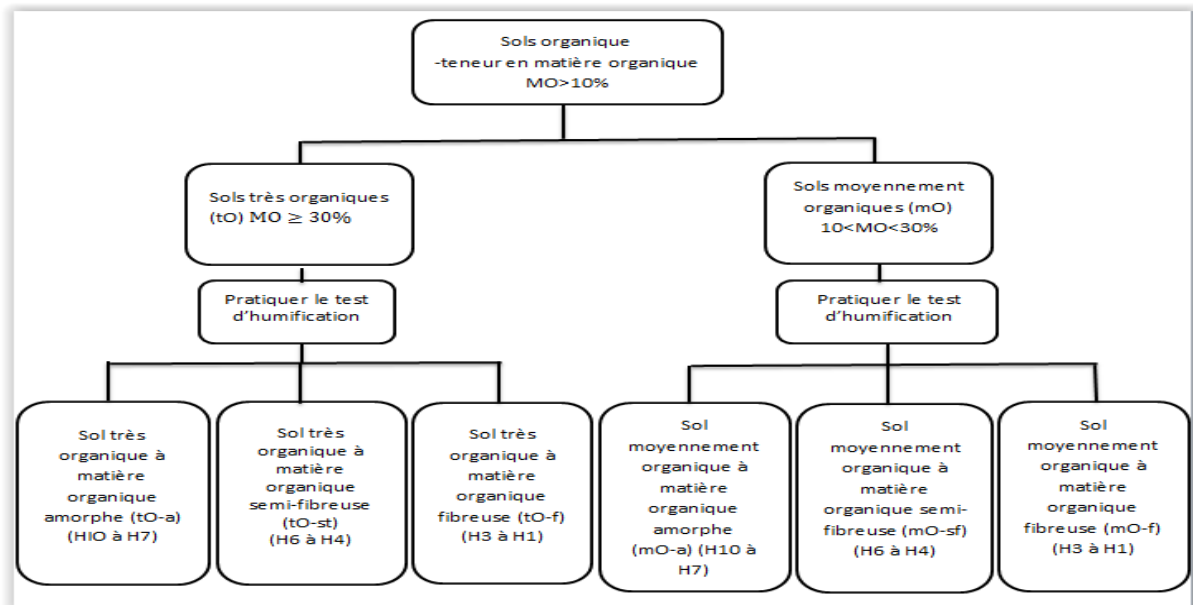
La classification LCPC est basée sur la courbe granulométrique, les limites d'atterberg, la teneur en matière organique et sur observations sur échantillons (couleur, odeur). cette classification comporte 8 classes pour les sols grenus, 8 pour les sols fins et 6 pour les sols organiques, comme le schématisé

Le sol organique est connu par son odeur, sa couleur et la présence des fibres noirs. La teneur en MO est exprimée par le rapport du poids de la MO sèche au poids de la matière sèche.

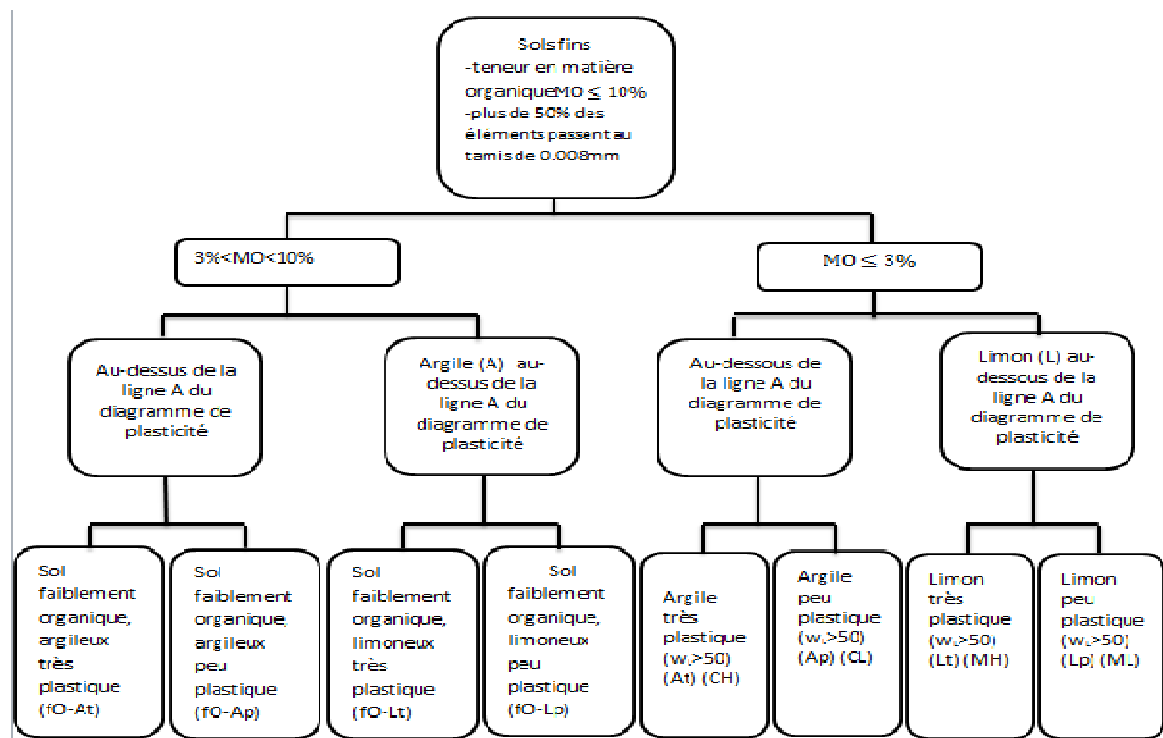
Le test d'humidification, mentionné dans la classification, permet d'estimer le degré de décomposition des MO dans le sol. L'essai consiste à comprimer l'échantillon organique et d'observer le liquide en sort (couleur et nature).



Sols grenus



Sols organiques



Sols fins