

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Université de Jijel, Département d'Architecture

2<sup>ème</sup> Année Architecture

Module : Construction 1

## Ch.III

# Notions de géotechnique et reconnaissance des sols

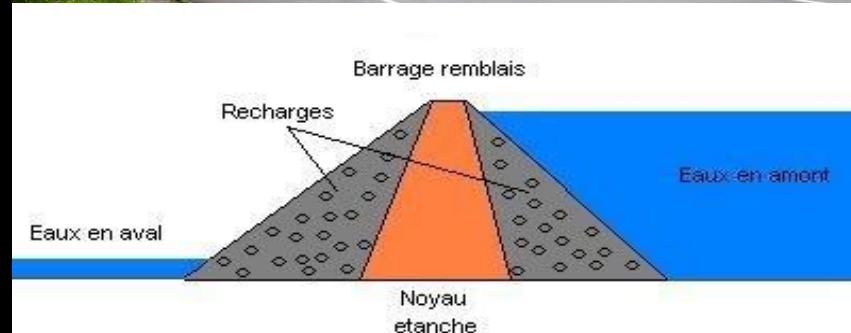


# Introduction

Les sols sont des matériaux naturels utilisés pour :

1. supporter les ouvrages  
(fondations superficielles et profondes),
2. sont supportés par des ouvrages  
(murs de soutènement, rideaux de palplanches),
3. sont des ouvrages (remblais, barrages).

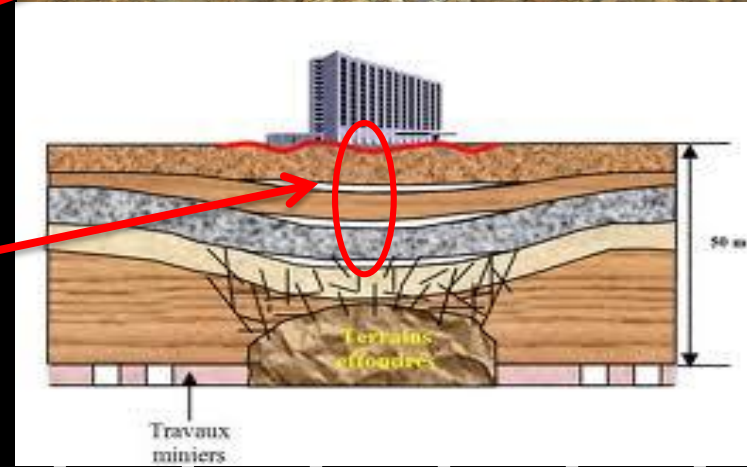
De là, une nouvelle science est née 20<sup>ème</sup> siècle :  
*c'est la mécanique des sols.*



# Objectif de la mécanique des sols

L'objectif de la mécanique des sols est de déterminer par tous les moyens appropriés :

1. les qualités des sols sous-jacents, leurs caractéristiques mécaniques, ainsi que leur portance;  
*La portance : est l'aptitude d'un terrain à supporter des charges.*
2. l'épaisseur de différentes couches rencontrées ;
3. les tassements sous l'action des surcharges amenées par les constructions.

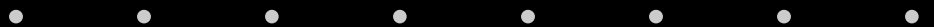


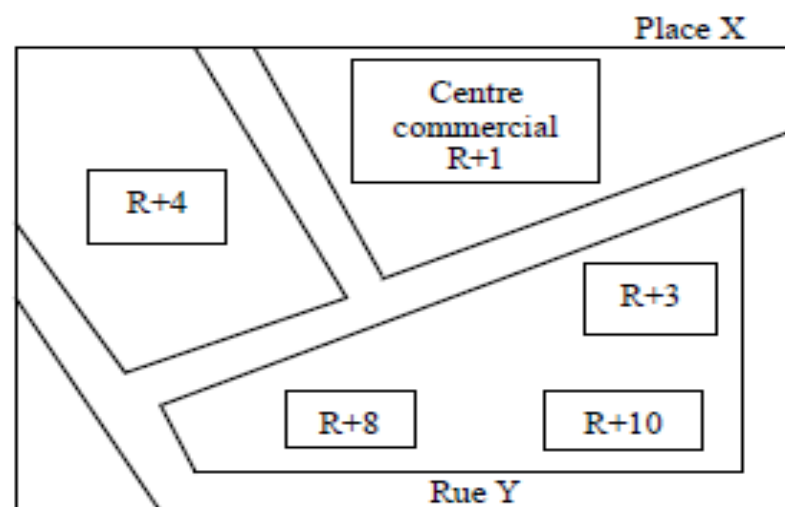


## But de reconnaissance des sols

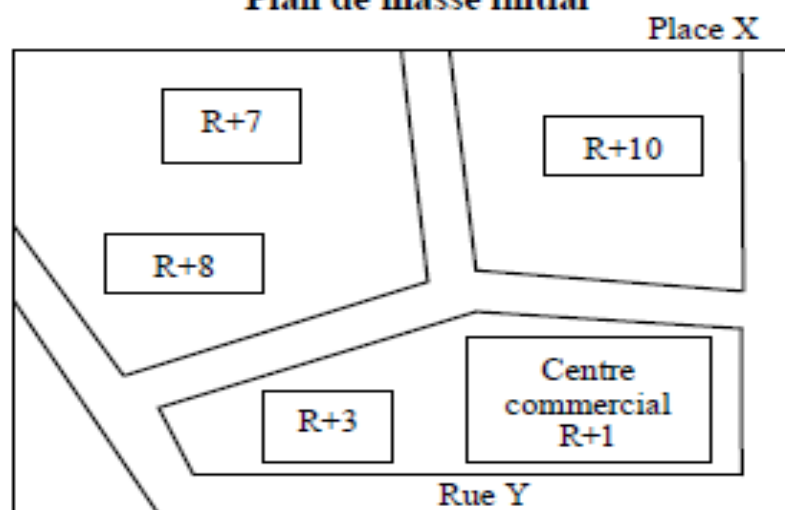
Une campagne de reconnaissance des sols doit toujours précéder l'étude de tout projet. Ses objectifs sont multiples :

1. rechercher des terrains adaptés à l'implantation d'ouvrages importants,
2. l'ébauche d'un schéma directeur ou d'un plan de masse en tenant compte des aléas des sols.



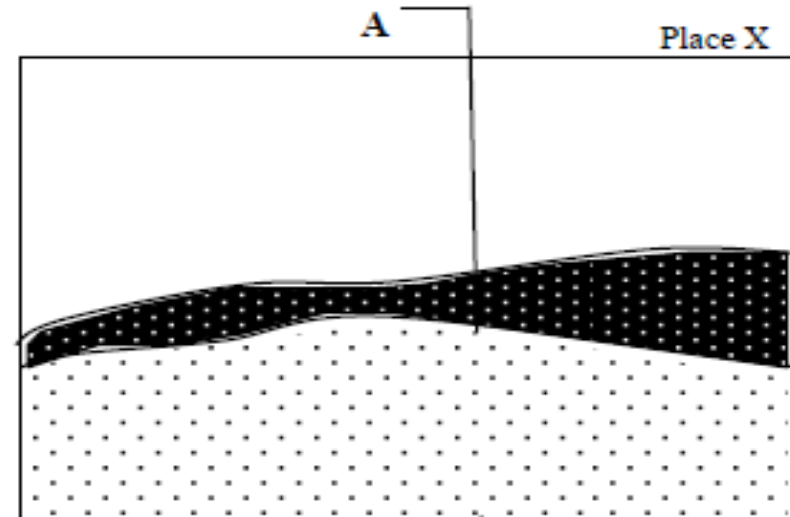


**Plan de masse initial**

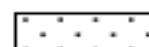


**Plan de masse définitif**

Implantation des immeubles apportant des surcharges importantes : « de préférence sur le substratum calcaire »



**Plan**



Argile molle



Grave argileuse



Substratum calcaire

**Nature des sols après sondage**

**Fig.1** Influence de la qualité des sols sur le plan de masse

•  
•  
•

## But des essais géotechniques

Les essais géotechniques permettent de connaître :

- la nature des différentes couches du terrain et leur épaisseur,
- leurs caractéristiques physiques et mécaniques,
- ainsi que la présence d'eau éventuelle.

Une connaissance approfondie du sol est indispensable pour :

1. définir le type de fondation à réaliser
2. limiter les risques de tassements ultérieurs.

L'étude comporte essentiellement :

1. la détermination des *caractéristiques physiques (au laboratoire)*
2. *Les caractéristiques mécaniques (au laboratoire et in-situ).*

# Caractéristiques physiques des sols

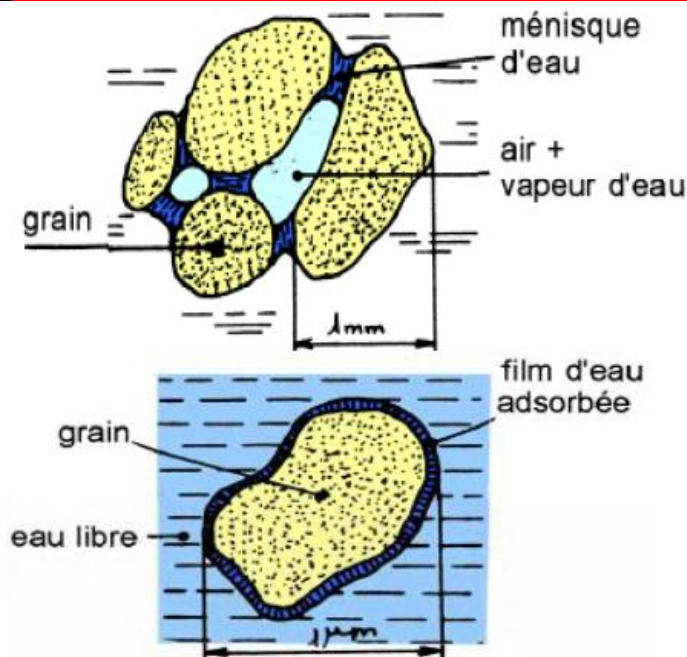
## Les deux catégories des matériaux

### *Les roches*

*agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes, (mécanique des roches).*

### *Les sols*

*Agrégats de grains minéraux pouvant être séparés sous l'effet d'actions mécaniques relativement faibles, (mécanique des sols)*



*Phase solide*

*Phase liquide*

*Phase gazeuse*

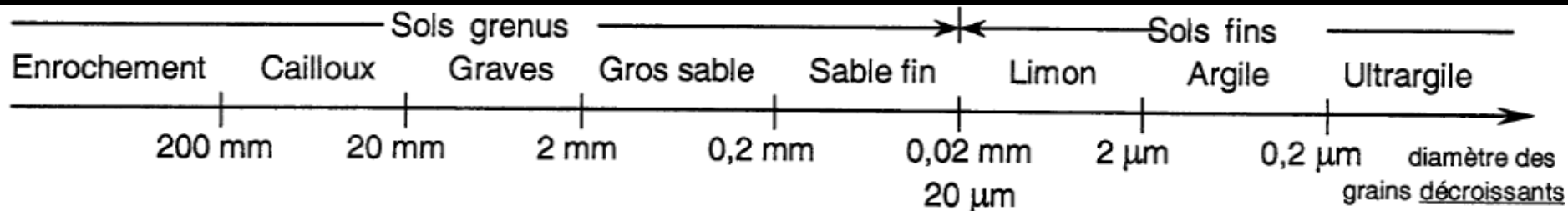
- Entre les grains du squelette, les vides peuvent être remplis par de l'eau, par un gaz ou les deux à la fois.
- Lorsque l'eau remplit tous les vides entre les grains solides, le sol est dit saturé.
- Lorsqu'il n'y pas d'eau, le sol est dit sec.

## Structures des sols

**Sols pulvérulents (sols grenus)** :  $D > 20$  microns (exemple : les sables) : Les grains se détachent les uns des autres sous leur poids. c'est par des réactions de contact grain à grain qu'un ensemble stable peut exister.

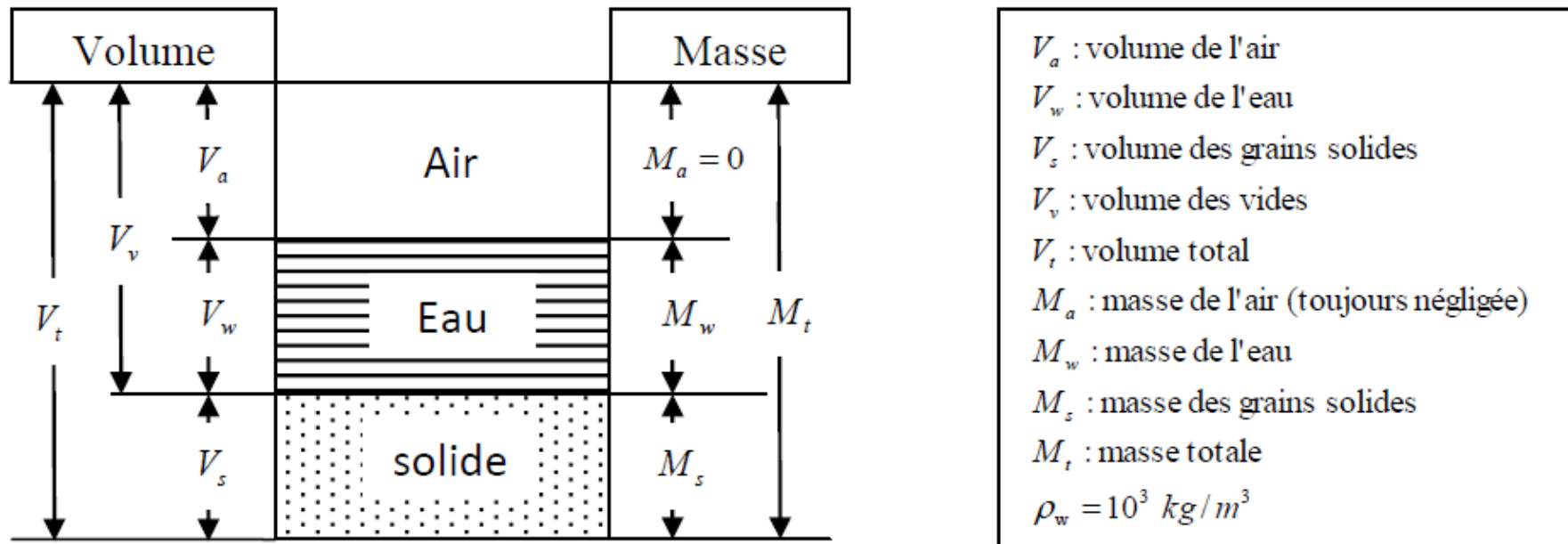
**Argiles** :  $D < 2$  microns : les particules restent collées les unes aux autres. Le sol présente une cohésion : il a l'apparence d'un solide et ne se désagrège pas sous l'effet de la pesanteur ou d'autres forces appliquées.

**Sols organiques** : lorsque les grains sont constitués de matière organique, le sol est dit organique. La présence dans les sols de matières organiques, qui sont à l'origine de textures lâches et d'une importante rétention d'eau, confèrent à ceux-ci une grande plasticité et une grande compressibilité.



## Identification d'un sol

Considérant la représentation suivante d'un sol dans laquelle les trois phases sont séparées.



Représentation conventionnelle des volumes et des masses d'un sol, montrée dans un diagramme de phases

# Les paramètres caractérisant le sol

## Les paramètres dimensionnels

*les masses volumiques, constitués par les masses et les volumes.*

▪ Indice des vides :

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1)$$

▪ Porosité :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (2)$$

## Les paramètres adimensionnels (sans dimension)

*Indiquent dans quelles proportions sont les différentes phases d'un sol. Ils sont très importants et essentiellement variables.*

On peut établir une relation entre  $e$  et  $n$  :

$$n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_v}{V_s} + \frac{V_s}{V_s}} = \frac{e}{e+1} \rightarrow n = \frac{e}{e+1} \quad (3)$$

Donc :

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (4)$$

## Les paramètres caractérisant le sol

- Degré de saturation : indique la quantité d'eau que contient le sol 
$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (5) \quad (\text{exprimé en } \%)$$
- Teneur en eau :  $\rightarrow W = \frac{M_w}{M_s} \quad (6) \quad (\text{exprimé en } \%)$
- Teneur en air :  $\rightarrow A_r = \frac{V_a}{V_t} \quad (7) \quad (\text{exprimé en } \%).$
- Densité des grains solides :  $G_s = \frac{M_s}{M_w} = \frac{\rho_s \cdot V_s}{\rho_w \cdot V_s} \rightarrow G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (8)$

## Les paramètres caractérisant le sol

■ Masse volumique apparente (humide total) :  $\Rightarrow \rho_h = \frac{M_t}{V_t} \quad (9)$

■ Masse volumique sèche :  $\Rightarrow \rho_d = \frac{M_s}{V_t} \quad (10)$

■ Masse volumique des grains solides :  $\Rightarrow \rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (11)$

On peut établir une relation entre  $\rho_d$  et  $\rho_s$  :

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t} = \frac{M_s}{V_s + V_v} = \frac{\frac{M_s}{V_s}}{\frac{V_s}{V_s} + \frac{V_v}{V_s}} = \frac{\rho_s}{1 + e}$$

Donc :  $\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + e} \quad (12)$

Masse volumique déjaugée (effective) :  $\Rightarrow \rho' = \rho_{sat} - \rho_w \quad (13)$

- 
- 
- 

## Remarque

**Remarque** : dans le cas où c'est le poids volumique  $\gamma$  qui intervient, les définitions précédentes restent valables, en remplaçant tous simplement les masses ( $M_i$ ) par leurs poids associés ( $P_i$ ) et  $\rho_i$  par  $\gamma_i$ . (  $\gamma = \frac{P}{V} = \frac{M \cdot g}{V} = \rho \cdot g$  )

## Relation entre les différents paramètres

Une relation peut être établie entre  $W$ ,  $S_r$ ,  $e$  et  $G_s$  :

$$W = \frac{M_w}{M_s} = \frac{V_w \cdot \rho_w}{V_s \cdot \rho_s} = \frac{V_w \cdot V_v}{V_s \cdot V_v} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} = \frac{V_w}{V_v} \cdot \frac{V_v}{V_s} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad \Rightarrow \quad W = \frac{S_r \cdot e}{G_s} \quad (14)$$

On peut établir aussi une relation entre  $\rho_h$ ,  $G_s$ ,  $W$ ,  $e$  et  $\rho_w$  :

$$\rho_h = \frac{M_t}{V_t} = \frac{M_s + M_w}{V_s + V_v} = \frac{M_s}{V_s} \left[ \frac{1 + M_w / M_s}{1 + V_v / V_s} \right] \quad \Rightarrow \quad \rho_h = \rho_s \cdot \left[ \frac{1 + W}{1 + e} \right] \quad (15)$$

## Relation entre les différents paramètres

Ou encore, si on remplace par  $W = \frac{S_r \cdot e}{G_s}$  on aura :

$$\rho_h = \rho_s \left[ \frac{1 + \left( \frac{S_r \cdot e}{G_s} \right)}{1 + e} \right] = \left[ \frac{\rho_s + \rho_s \cdot \left( \frac{S_r \cdot e}{G_s} \right)}{1 + e} \right] = \left[ \frac{(G_s \cdot \rho_w) + (S_r \cdot e \cdot \rho_w)}{1 + e} \right] = \rho_w \left( \frac{G_s + S_r \cdot e}{1 + e} \right)$$

Donc :  $\rho_h = \rho_s \cdot (1 - n) + n \cdot S_r \cdot \rho_w$  (16)

- Deux cas qui se représentent :

a- **Sol sec** : ( $S_r = 0$ ), et  $\rho_h$  devient égale à  $\rho_d$  :  $\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + e} = \rho_s \cdot (1 - n)$  (17)

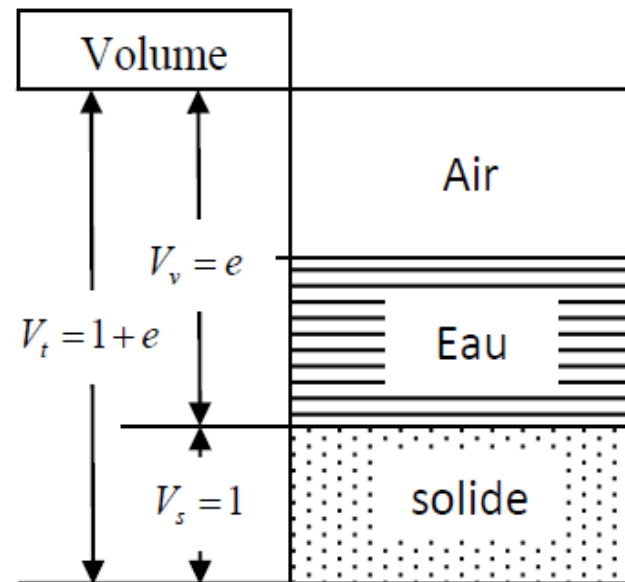
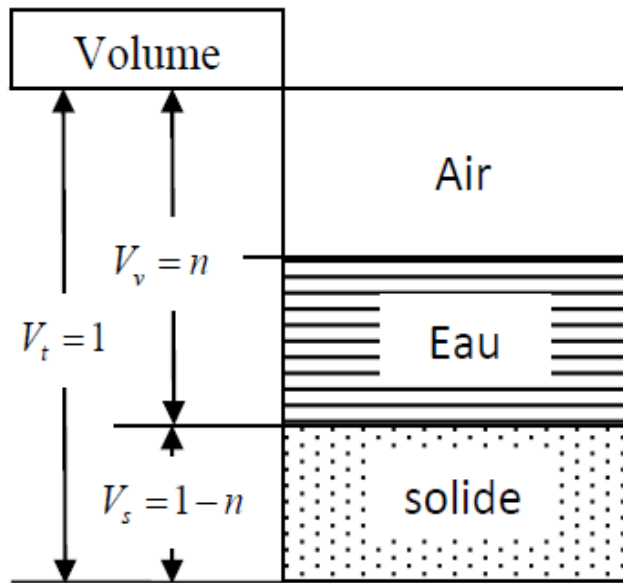
b- **Sol saturé** : ( $S_r = 1$ ), et  $\rho_h$  devient égale à  $\rho_{sat}$  :  $\rho_{sat} = \rho_w \cdot \left( \frac{G_s + e}{1 + e} \right) = \rho_s \cdot (1 - n) + n \cdot \rho_w$  (18)

## Relation entre les différents paramètres

On peut encore établir une expression donnant la masse volumique déjaugée  $\rho'$ :

$$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w = \rho_w \left( \frac{G_s + e}{1 + e} \right) - \rho_w = \rho_w \cdot \frac{(G_s + e - 1 - e)}{1 + e} = \rho_w \left( \frac{G_s - 1}{1 + e} \right) \quad \Rightarrow \quad \rho' = \frac{\rho_s - \rho_w}{1 + e} \quad (19)$$

On peut également établir les relations déjà trouvées en utilisant l'un des diagrammes de phases suivant :



•  
•  
•

## Autres caractéristiques

- Il est à noter que parmi tous les paramètres définis précédemment les paramètres sans dimensions sont les plus importants. Ils caractérisent l'état dans lequel se trouve le sol c'est-à-dire l'état de compacité du squelette ainsi que les quantités d'eau et d'air contenues dans le sol.
- **Compacité : qualité de ce qui est compacte (dense).**
- En réalité, ces caractéristiques ne permettent pas une classification des terrains. A cette fin sont étudiés :
  - La granulométrie ;
  - La plasticité ;
  - La perméabilité.

## Granulométrie

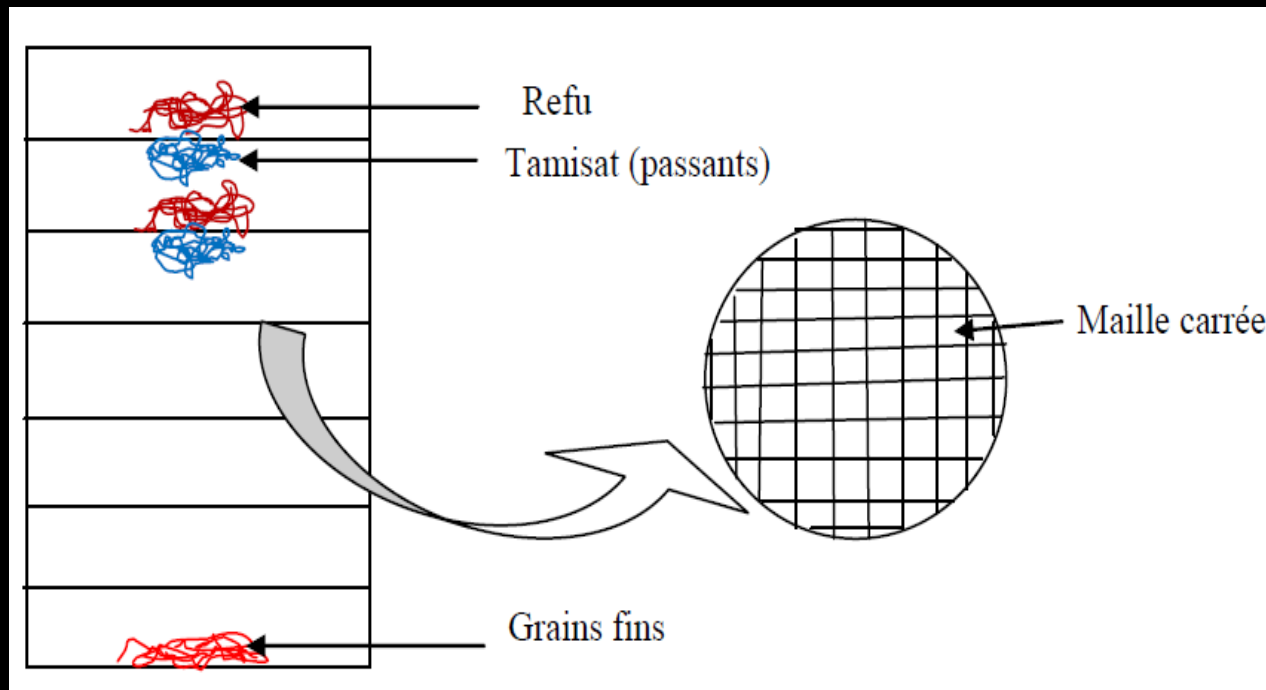
L'analyse granulométrique a pour but de déterminer quantitativement la distribution des particules de sol par classes de diamètres. Elle est obtenue par tamisage (à sec ou sous l'eau) pour des grains de diamètre apparent supérieur à 0.08 mm, par essai de sédimentation pour les grains de diamètre apparent inférieur à 0.08 mm.



# Granulométrie

Les résultats des essais de tamisage et de sédimentation sont couramment représentés par une courbe granulométrique.

La courbe granulométrique représente le poids des tamisas cumulés (échelle arithmétique) en fonction du diamètre des particules solides (échelle logarithmique).



# Courbe granulométrique

La courbe granulométrique donne le pourcentage en poids des particules de taille inférieure ou égale à un diamètre donné.

\* Le coefficient d'uniformité :

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

\* Le coefficient de courbure :

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

$D_y$  : Ouverture du tamis en (mm)  
laissant passer y % du poids des grains.

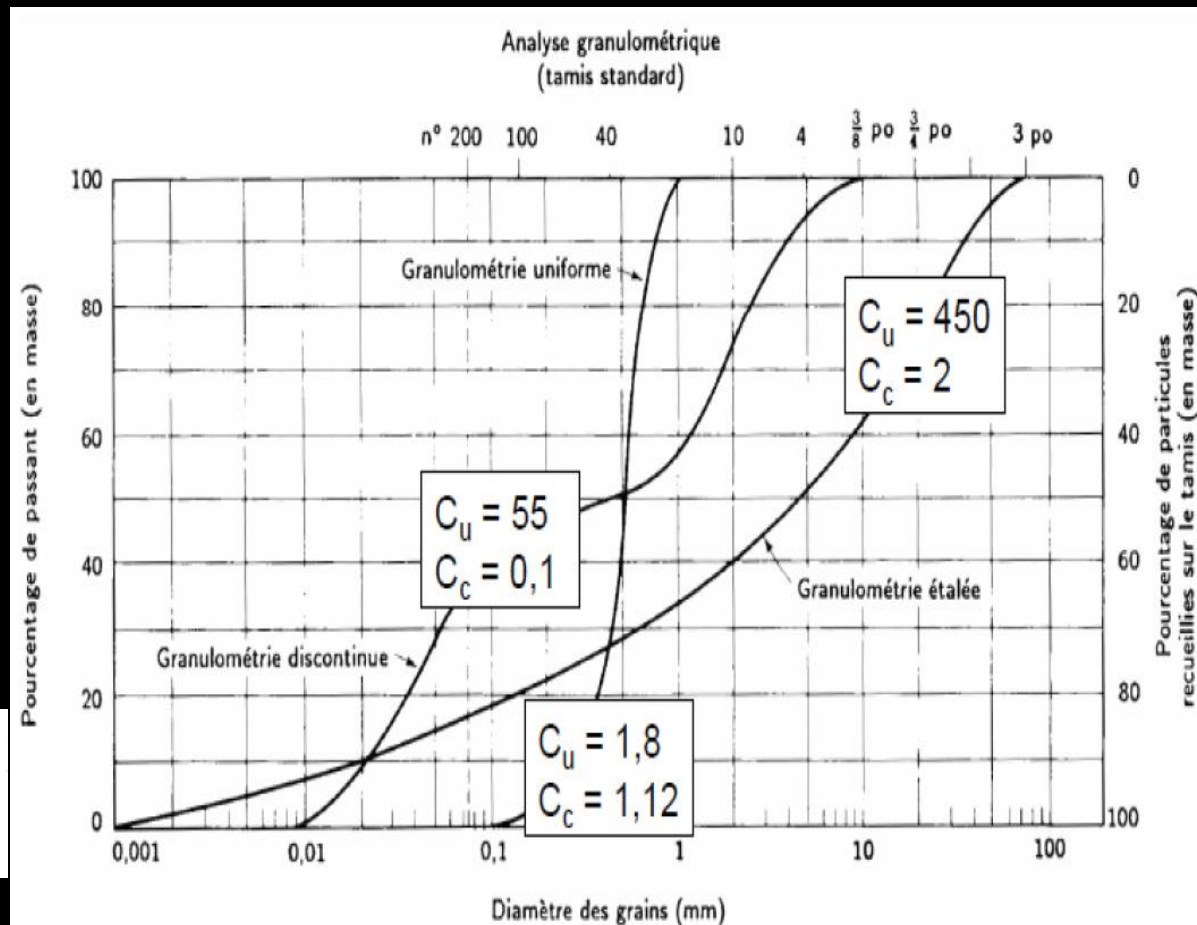


Fig.3. courbes granulométriques types

## Description de la répartition granulométrique

Lorsque certaines conditions sur  $C_u$  et  $C_c$  sont satisfaites

le sol est dit *bien gradué*

pas de prédominance d'une fraction particulière

Quand sa granulométrie est discontinue

le sol est dit *mal gradué*

prédominance d'une fraction particulière

Les sols bien gradués constituent des dépôts naturellement denses avec une capacité portante élevée.

Ils peuvent être aisément compactés en remblais et forme des pentes stables.

## Classification des sols

Classer un sol consiste à l'identifier grâce à des mesures quantitatives et à lui donner un nom. De nombreuses classifications des sols ont été réalisées dans chaque pays, nous donnons ci-après la classification des sols qui était utilisée par le Laboratoire des Ponts et Chaussées (L.P.C).

Pour les sols à granulométrie non uniforme, on distingue :

- les sols grenus : plus de 50 % des éléments en poids  $> 0.08$  mm,
- les sols fins : plus de 50 % des éléments en poids  $< 0.08$  mm,
- les sols organiques dont la teneur en matière organique est  $> 10$  %.

**Sols grenus :** la classification des sols grenus se fait par la granulométrie et les limites d'Atterberg. elle est précisée dans le *tableau.2*.

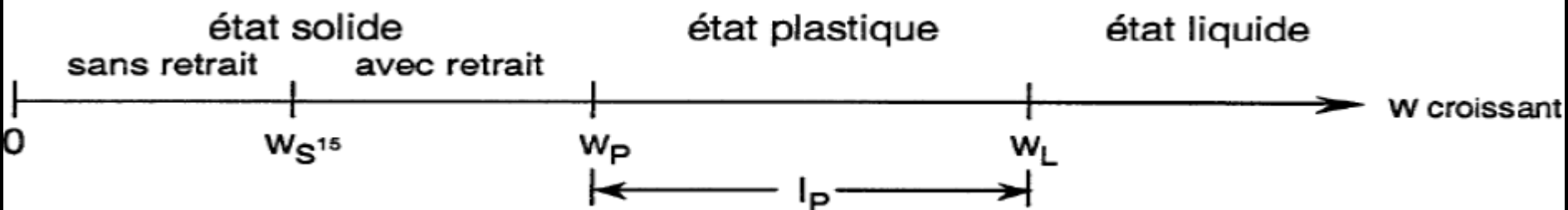
**Sols fins :** la classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité (*fig.7*).

**Limites d'Atterberg** : c'est l'un des essais d'identification les plus importants. On peut considérer quatre états caractérisant la consistance (état de cohérence) des sols fins. Pour des teneurs en eau décroissantes :

La limite de liquidité, notée  $W_L$  qui sépare l'état liquide de l'état plastique,

La limite plasticité, notée  $W_P$  qui sépare l'état plastique de l'état solide,

La limite de retrait, notée  $W_S$  qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait.



Indice de plasticité :  $I_P = W_L - W_P$  (mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol)

Indice de consistance :  $I_C = \frac{W_L - W_{nat}}{I_P}$ .

Dans les sols en place, la teneur en eau naturelle  $W_{nat}$  est généralement comprise entre  $W_L$  et  $W_P$ , très près de  $W_P$ .

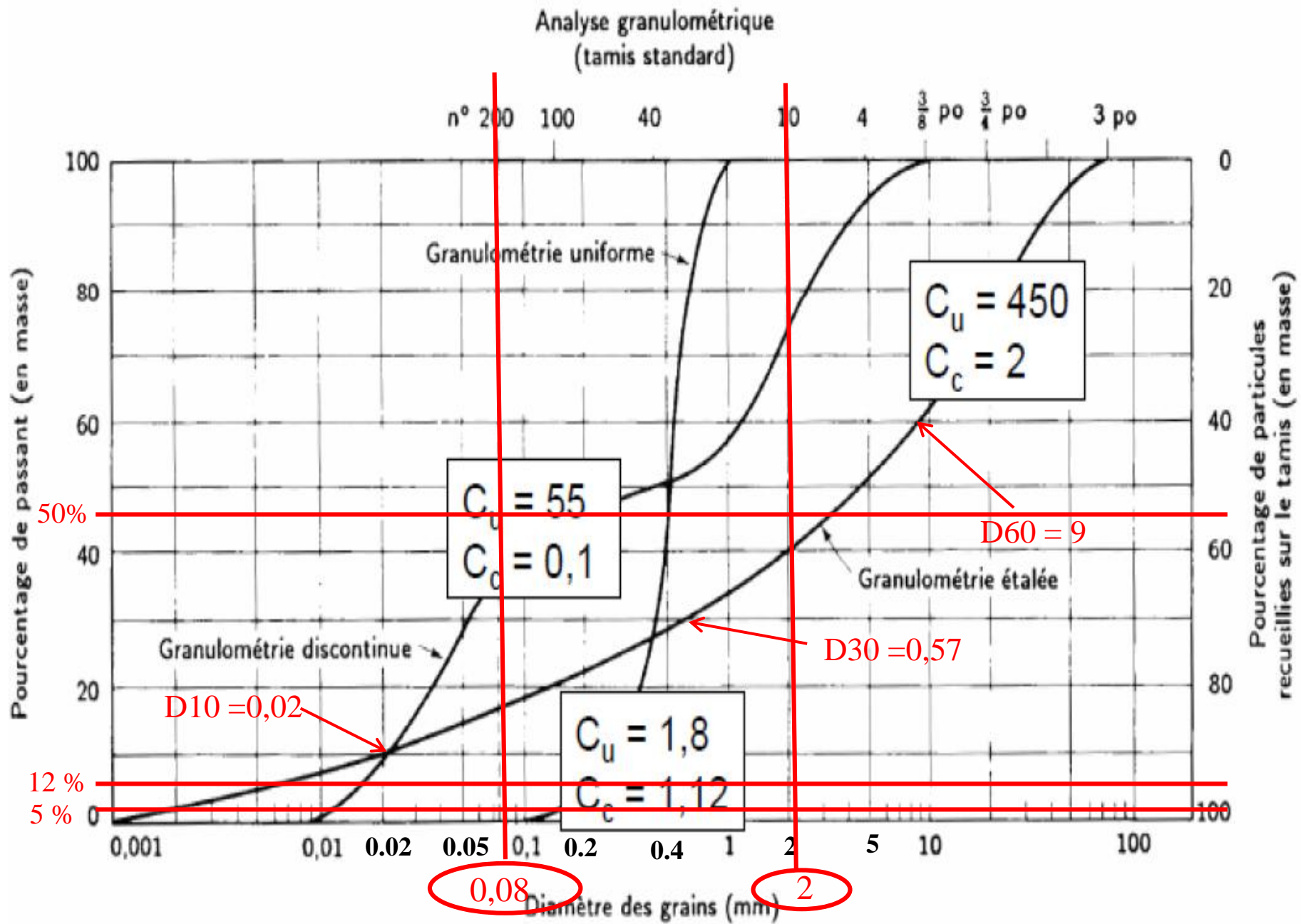


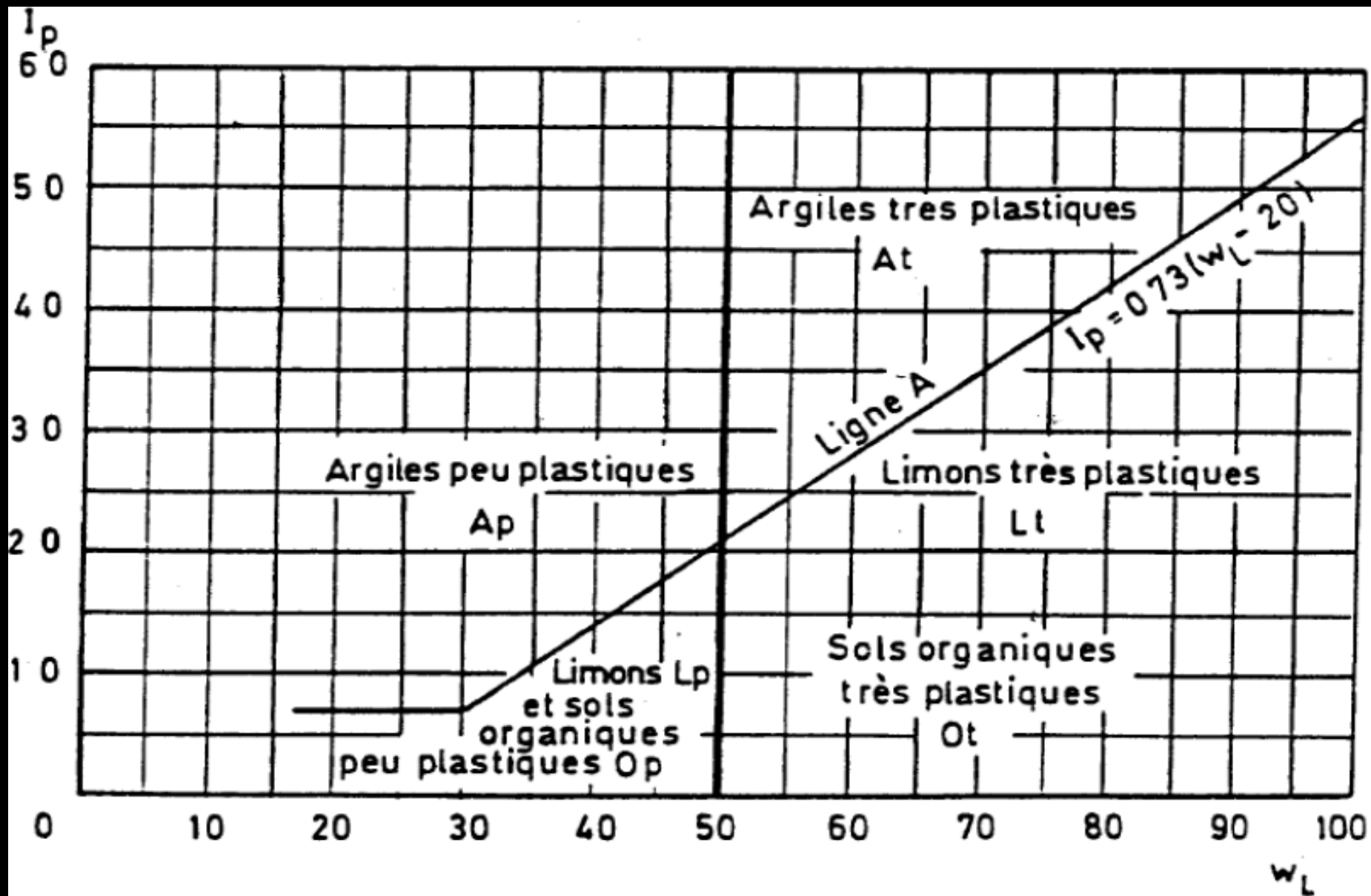
Fig.3. courbes granulométriques types

Définitions			Symboles	Conditions	Désignations géotechniques
<b>GRAVES</b>	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	<b>Gb</b>	$c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $c_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			<b>Gm</b>	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	<b>GL</b>	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A <sup>17</sup>	grave limoneuse
			<b>GA</b>	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A <sup>17</sup>	grave argileuse
<b>SABLES</b>	Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5% d'éléments < 0,08 mm	<b>Sb</b>	$c_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $c_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			<b>Sm</b>	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12% d'éléments < 0,08 mm	<b>SL</b>	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A <sup>17</sup>	sable limoneux
			<b>SA</b>	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A <sup>17</sup>	sable argileux

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 %  $\Rightarrow$  on utilise un double symbole

- pour les graves : Gb-GL      Gb-GA      Gm-GL      Gm-GA
- pour les sables : Sb-SL      Sb-SA      Sm-SL      Sm-SA

**Tableau.2.** Classification L.P.C. des sols grenus



Abaque de plasticité de Casagrande

**Fig.7.** Classification L.P.C. des sols fins

## Caractéristiques mécaniques des sols

L'expérience montre que l'étude physique d'un sol, en laboratoire, est rarement suffisante pour établir un plan de fondation. Une étude des caractéristiques mécaniques est souvent indispensable.

Il s'agit de déterminer :

- La pression admissible à prendre en compte sur les sols ;
- La compressibilité des sols argileux, une compressibilité importante est la cause du tassement des ouvrages supportés.

La reconnaissance des sols fait appel à différentes techniques de sondages et d'essai sur site (in-situ) et en laboratoire en vue de déterminer les caractéristiques principales des diverses couches de terrains rencontrées.

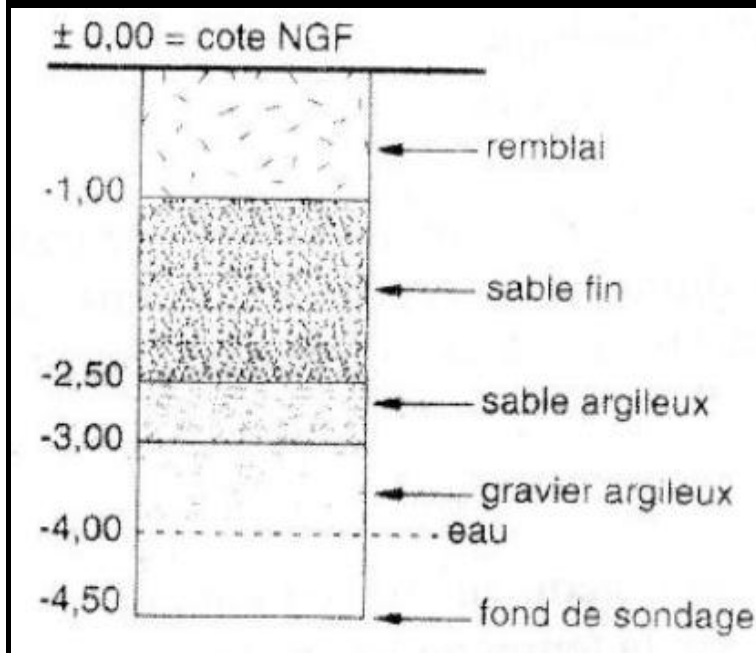
**Sondage:** action de creuser pour prélever un échantillon dans le sous-sol, pour effectuer des mesures.

# 1. Reconnaissances in-situ

Elles se font par des excavations ou des forages de grandes dimensions ou de petites sections. Lors de l'exécution de ce type de reconnaissance, sont relevées :

- Les niveaux des différentes couches rencontrées ;
- Leurs épaisseurs ;
- La profondeur atteinte par le sondage.

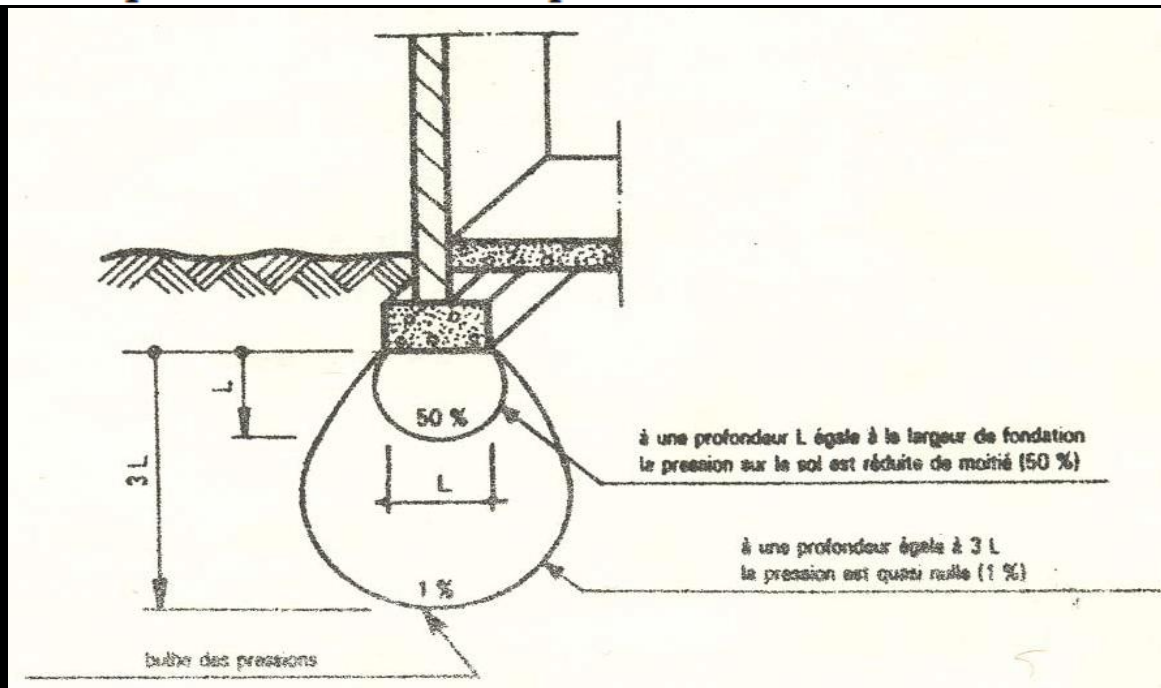
Ces renseignements sont reportés sur une coupe mentionnant le niveau du terrain naturel et le niveau des arrivées d'eau éventuelles



## Remarque

Il ne faut pas arrêter le sondage à l'arriver du bon sol (sol de bonne résistance), et ce pour *assurer que l'épaisseur du bon sol est suffisante, et qu'il y a pas en dessous une couche d'un mauvais sol* (sol compressible de faible résistance).

Pratiquement il est conseillé de prospecter le sous-sol en dessous du niveau prévu des fondations sur une profondeur égale à 3 fois la largeur de la semelle. En effet à cette distance la pression exercée par le bâtiment est quasi nulle.



## 2. Essais au laboratoire

Leurs but est de déterminer la capacité portante des sols de fondation et d'évaluer le tassement et la compressibilité des sols argileux. Ces essais peuvent être :

- L'essai au triaxial ;
- L'essai de compressibilité à l'oedomètre ;
- L'essai de consolidation.

*La capacité portante d'un sol de fondation est la pression limite ou maximale que pourra supporter le sol de fondation sans subir de déformations importantes*