

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**



**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de  
la Recherche Scientifique**

**Université des Sciences et de la technologie  
Oran Mohamed Boudiaf  
Faculté d'architecture et de génie civil  
Département de génie civil**



**Polycopié de Travaux Dirigés  
De Mécanique des Sols I**

**Élaboré par**

**Dr. BOUKHARI Ahmed**

***Année universitaire: 2023-2024***

# Sommaire

|   |      |
|---|------|
| Liste des notations                                     | page |
| Préface   |      |
| Rappel de cours sur les Propriétés physiques des sols   | 1    |
| Partie 1 : Propriétés physiques des sols                | 4    |
| Rappel de cours Classification des sols                 | 7    |
| Partie 2 : Classification des sols                      | 12   |
| Rappel de cours sur compactage des sols                 | 17   |
| Partie 3 : Compactage des sols                          | 19   |
| Solution de la partie 1 : Propriétés physiques des sols | 22   |
| Solution de la partie 2 : Classification des sols       | 32   |
| Solution de la partie 3 : Compactage des sols           | 47   |
| Références  |      |

## Liste des notations

| Symboles                | Définition  |
|-------------------------|---|
| <b>Cc</b>               | Coefficient de courbure                           |
| <b>C<sub>U</sub></b>    | Coefficient d'Uniformité d'Hazen                  |
| <b>d<sub>i</sub></b>    | Diamètre correspondant à i % de tamisat cumulé    |
| <b>D<sub>max</sub></b>  | Diamètre des grains équivalent a 95% des passants |
| <b>e</b>                | Indice des vides                                  |
| <b>γ</b>                | Poids volumique total du sol                      |
| <b>γ'</b>               | Poids volumique déjaugé                           |
| <b>GA</b>               | Grave argileuse                                   |
| <b>Gb</b>               | Grave propre bien gradué                          |
| <b>γ<sub>d</sub></b>    | Poids spécifique du sol sec                       |
| <b>γ<sub>dmax</sub></b> | Le poids volumique sec maximum                    |
| <b>GL</b>               | Grave limoneuse                                   |
| <b>Gm</b>               | Grave propre mal gradué                           |
| <b>γ<sub>s</sub></b>    | Poids volumique des particules solides            |
| <b>GS</b>               | Densité des grains solides                        |
| <b>γ<sub>w</sub></b>    | Poids volumique de l'eau                          |
| <b>I<sub>c</sub></b>    | Indice de Consistance                             |
| <b>I<sub>L</sub></b>    | Indice de Liquidité                               |
| <b>I<sub>p</sub></b>    | Indice de plasticité                              |
| <b>ø</b>                | Diamètre des grains du sol                        |
| <b>SA</b>               | Sable argileux                                    |
| <b>Sb</b>               | Sable propre bien gradué                          |
| <b>SL</b>               | Sable limoneux                                    |
| <b>Sm</b>               | Sable propre mal gradué                           |
| <b>Sr</b>               | Degré de saturation                               |
| <b>V</b>                | Volume total                                      |
| <b>V<sub>a</sub></b>    | Volume de l'air                                   |
| <b>V<sub>s</sub></b>    | Volume des grains solides                         |
| <b>V<sub>v</sub></b>    | Volume des vides                                  |
| <b>V<sub>a</sub></b>    | Volume d'air                                      |
| <b>V<sub>ω</sub></b>    | Volume de l'eau                                   |
| <b>W<sub>L</sub></b>    | Limite de liquidité                               |
| <b>w<sub>opt</sub></b>  | La teneur en eau optimale                         |
| <b>W<sub>p</sub></b>    | Limites de plasticité                             |

## Liste des notations

|                              |                       |
|------------------------------|-----------------------|
| <b><math>\omega_s</math></b> | Limites de retrait    |
| <b><math>W_\omega</math></b> | Poids du volume d'eau |
| <b><math>\eta</math></b>     | Porosité              |
| <b><math>N</math></b>        | Nombre de coups       |
| <b><math>Tc\%</math></b>     | Tamisé cumulé         |
| <b><math>Rc\%</math></b>     | Refus cumulé          |
| <b><math>Ta</math></b>       | Teneur en air         |
| <b><math>\omega</math></b>   | Teneur en eau         |

## Préface

Le sol peut constituer une base d'appuis pour l'ensemble de l'ouvrage tel que route, tunnel, barrage poids, mur de soutènement, aéroport, ou un point d'appuis pour quelques éléments seulement tel que bâtiment, pont, barrage en arc .etc. La mécanique des sols est la science qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques qui permettent :

- ✓ D'identifier les caractéristiques qui régissent le comportement mécanique du sol.
- ✓ L'analyse de l'interaction sol-structure
- ✓ La réalisation correcte des ouvrages enterrés.

A titre indicatif, la mécanique des sols traite les problèmes relatifs aux fondations diverses, ouvrages de soutènement, remblais et structures en terre, stabilité des pentes et talus, route, piste d'atterrissage, tunnels, mines...

Ce polycopié est destiné aux étudiants en deuxième année du système Licence Master-Doctorat (L.M.D), spécialité : Génie Civil permet à l'étudiant d'acquérir les principes de base de la mécanique des sols et de se familiariser avec le matériau qu'est le sol. Il aborde les thèmes suivants : les propriétés physiques des sols, l'identification et la classification des sols, les propriétés hydrauliques des sols; le compactage et Il comporte des exercices résolus sur les différents chapitres du module de MDS 1 (mécanique des sols)

Je souhaite que ce recueil d'exercices et problèmes résolus de la mécanique des sols puisse aider de manière efficace la majorité des étudiants.



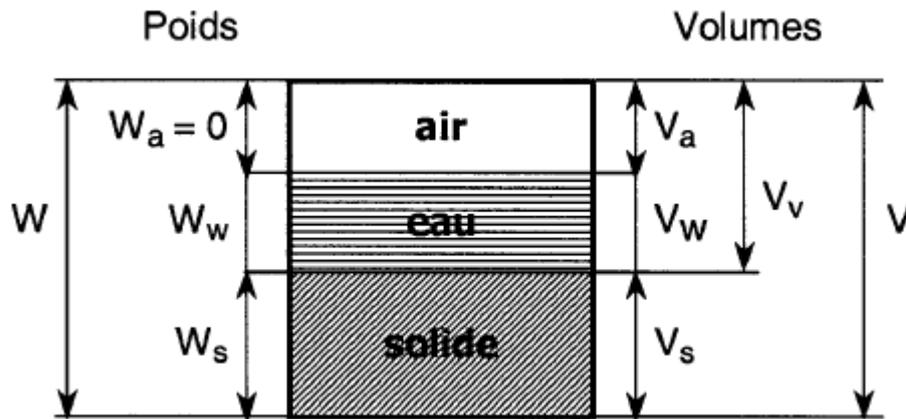
# Partie 1

## Propriétés Physiques des sols

---

## Rappel du cours Partie01: Propriétés physiques des sols

### Paramètres caractérisant l'état des sols



Représentation conventionnelle d'un volume de sol  
(Poids et volumes des différentes phases)

### 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:

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

**Tab1:** Paramètres caractérisant l'état des sols

| Symbole    | Désignation                        | Définition                  |
|------------|------------------------------------|-----------------------------|
| $\gamma$   | Poids volumique humide du sol      | $\frac{W}{V}$               |
| $\gamma_s$ | Poids volumique des grains solides | $\frac{W_s}{V_s}$           |
| $\gamma_d$ | Poids volumique du sol sec         | $\frac{W_s}{V}$             |
| $\gamma_w$ | Poids volumique de l'eau           | $\frac{W_\omega}{V_\omega}$ |
| $\gamma'$  | Poids volumique déjaugé            | $\gamma - \gamma_w$         |
| <b>GS</b>  | Densité des grains                 | $\frac{\gamma_s}{\gamma_w}$ |
| $\omega$   | Teneur en eau                      | $\frac{W_\omega}{W_s}$      |
| <b>e</b>   | Indice des vides (peut être > 1)   | $\frac{V_v}{V_s}$           |
| <b>n</b>   | Porosité (n < 1)                   | $\frac{V_v}{V}$             |
| <b>Sr</b>  | Degré de saturation                | $\frac{V_\omega}{V_v}$      |

On prend souvent  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$

**NB :** L'indice des vides et la porosité indiquent la portion relative des vides dans un échantillon de sol, les deux termes sont utilisés en mécanique des sols, bien que l'indice des vides soit le plus utile (utilisé) et on peut déduire les deux relations suivantes qui relient entre les deux

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

### Relation entre les différents paramètres

Tous les paramètres précédemment définis sont dépendants entre eux. D'après le Schéma d'un volume élémentaire, on peut écrire les relations suivantes:

**Tab2:** Relation entre les différents paramètres du sol

| Paramètre                      | Formule           | Teneur en eau $\omega$  | Porosité $n$   | Indice des vides $e$                                 | Poids volumique $\gamma$  | Poids volumique sec $\gamma_d$  |
|--------------------------------|-------------------|---|--|--|---|---|
| Teneur en eau $\omega$         | $\frac{P_w}{P_s}$ | <del> </del>  | $\frac{n \cdot Sr \cdot \gamma_w}{1 - n \cdot \gamma_s}$       | $\frac{e \cdot Sr \cdot \gamma_w}{\gamma_s}$         | $\frac{Sr \cdot \gamma_w \cdot \gamma_s - \gamma}{\gamma_s \cdot \gamma - Sr \cdot \gamma_w}$                   | $Sr \cdot \gamma_w \left( \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$                                      |
| Porosité $n$                   | $\frac{V_V}{V_t}$ | $\frac{\omega \cdot \gamma_s}{\omega \cdot \gamma_s + Sr \cdot \gamma_w}$                               | <del> </del>   | $\frac{e}{1 + e}$                                    | $\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s - Sr \cdot \gamma_w}$  | $\gamma_d \left( \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$   |
| Indice des vides $e$           | $\frac{V_V}{V_s}$ | $\frac{\omega \cdot \gamma_s}{Sr \cdot \gamma_w}$   | $\frac{n}{1 - n}$  | <del> </del>   | $\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma - Sr \cdot \gamma_w}$  | $\gamma_s \left( \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$   |
| Poids volumique $\gamma$       | $\frac{P_t}{V_t}$ | $\frac{(1 + \omega) \cdot \gamma_s \cdot Sr \cdot \gamma_w}{\omega \cdot \gamma_s + Sr \cdot \gamma_w}$ | $\frac{(1 - n) \cdot \gamma_s}{1 + n \cdot Sr \cdot \gamma_w}$ | $\frac{\gamma_s + e \cdot Sr \cdot \gamma_w}{1 + e}$ | <del> </del>  | $(1 + \omega) \cdot \gamma_d$   |
| Poids volumique sec $\gamma_d$ | $\frac{P_s}{V_t}$ | $\frac{\gamma_s \cdot Sr \cdot \gamma_w}{\omega \cdot \gamma_s + Sr \cdot \gamma_w}$                    | $(1 - n) \cdot \gamma_s$                                       | $\frac{\gamma_s}{1 + e}$                             | $\frac{\gamma}{1 + \omega}$   | <del> </del>  |
| Degré de saturation $Sr$       | $\frac{V_w}{V_V}$ | $\frac{\omega}{\gamma_w \left( \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)}$                        | $\frac{(1 - n) \cdot \omega \cdot \gamma_s}{n \cdot \gamma_w}$ | $\frac{\omega \cdot \gamma_s}{e \cdot \gamma_w}$     | $\frac{\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\gamma_d}}{\gamma_w \left( \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)}$ | $\frac{\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\gamma_d}}{\gamma_w \left( \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)}$ |

## Partie N° 01 : Propriétés physiques des sols

### Exercice 01

Un échantillon cylindrique d'argile saturée compacté a un diamètre de 70 mm, une hauteur de 18.75 mm et une masse de 155g. la densité des grains solides est de 2.6

1. déterminez l'indice des vides et le poids volumique de cet échantillon si sa teneur en eau est de 19%
2. déterminez le poids des grains solides
3. déterminez le pourcentage de l'air contenu dans l'échantillon cylindrique.

### Exercice 02 :

On connaît pour un sol une masse totale  $M_t=130$  g aussi  $M_s=122$  g et Volume total de  $V_t=56.4\text{cm}^3$  une densité des grains solides  $=2,65$ .

Calculer la teneur en eau  $\omega$ , indice des vides  $e$ , le degré de saturations  $s_r$  ?

### Exercice 03 :

Un échantillon intact de sol est essayé au laboratoire et l'on obtient les résultats suivants:

Un indice des vides  $e=0.62$ , une teneur en eau 12 % et une densité sèche  $\gamma_s=27$  KN/ m<sup>3</sup>

Déterminer :

1. le poids volumique sec,
2. le poids volumique humide,
3. la teneur en eau à la saturation et
4. le poids volumique à la saturation.

### Exercice 04 :

Un échantillon de sol a une masse totale (M) de 2350kg, un volume total (V) de 1,20m<sup>3</sup> et une teneur en eau (W) de 8,6%. Le constituant solide des grains a un poids volumique de  $\gamma_s=27,1$  kN/m<sup>3</sup>. On demande de calculer :

1. La masse volumique et le poids volumique humide.
2. La masse volumique et le poids volumique du sol sec.
3. L'indice des vides (e) et la porosité (n).
4. Le volume d'eau dans l'échantillon.
5. Le pourcentage du volume d'air (Ta).
6. Le degré de saturation  $S_r$ .
7. La teneur en eau du sol saturé  $\omega_{sat}$ .
8. La masse volumique du sol saturé  $\gamma_{sat}$ .

### Exercice 05 :

Le poids volumique saturé d'un sol est  $19,5 \text{ kN/m}^3$  et la densité des grains solides ( $\gamma_n / \gamma_w$ ) est de 2.65.

1. Démontrer l'expression suivante :  $\gamma_{\text{sat}} = \gamma_d + n \cdot \gamma_w$
2. Déterminer la masse volumique du sol sec.

### **Exercice 06 :**

Le poids volumique total mesuré en place sur un sol humide est égale à  $1,90 \text{ g/cm}^3$ . Sa teneur en eau s'élève à 12% et la densité de ses grains est de 2,85. Déterminez :

1. Sa masse volumique sèche.
2. Sa porosité (n).
3. Son indice des vides (e).
4. Son degré de saturation  $S_r$ .
5. Sa teneur en eau à l'état saturé  $w_{\text{sat}}$ .
6. Son poids volumique à l'état saturé  $\gamma_{\text{sat}}$ .

### **Exercice 07 :**

Démontrer les formules suivantes :

- 1)  $n = \frac{e}{1+e}$
- 2)  $\gamma_h = \frac{1+\omega}{1+e} \gamma_s$
- 3)  $\gamma_d = (1 - n) \gamma_s$
- 4)  $\gamma_h = (1 - n) \gamma_s + n S_r \gamma_w$

### **Exercice 08 :**

Sur un échantillon d'argile saturée, on connaît les paramètres suivants :

- Masse totale : 1526 g
- Masse sèche : 1053 g
- Poids volumique spécifique des grains solides  $\gamma_s = 25 \text{ kN/m}^3$ .

Calculer :

1.  $W, e, n, \gamma, \gamma_d$

### **Exercice 09 :**

On considère un sol ayant un poids volumique sec égal à  $15 \text{ kN/m}^3$  et un degré de saturation  $S_r = 40\%$ . Lors de compactage le poids volumique sec augmente de  $20\%$ .

- ❖ Connaissant le poids volumique des grains solides égal à  $27 \text{ kN/m}^3$ , déterminer la teneur en eau initiale du sol ainsi que l'augmentation du degré de saturation du sol au compactage ?

## Partie 2 : Classification des sols

---

## Rappel de cours Partie 2: Classification des sols

### Analyse granulométrique :

Elle permet d'obtenir la répartition en pourcentage des grains solides selon leurs dimensions. On distingue les différentes proportions granulaires des sols :

- Tamisage : pour les éléments de diamètre  $\geq 80\mu$ . Elle se fait à l'aide des tamis.
- Sédimentométrie : pour les éléments de diamètre  $\leq 80\mu$ . Elle est basée sur la loi de stock
- Coefficient de Courbure :  $C_C = d_{30}^2 / d_{10} \cdot d_{60}$
- Coefficient d'Uniformité d'Hazen :  $C_U = d_{60} / d_{10}$

Si :  $C_U > 5$ ..... Granulométrie étalée

$C_U < 5$ ..... Granulométrie serrée

Identification des sols cohérents (fins) - Limites d'Atterberg

$$\omega_L = \omega \cdot \left(\frac{N}{25}\right)^{0,125}$$

$\omega$  : Teneur en eau au moment de l'essai à N coups

Classification des sols selon les différents indices

| $I_p = \omega_L - \omega_p$ |                 | $I_c = \frac{\omega_L - \omega}{I_p}$ |                       | $I_L = \frac{\omega - \omega_p}{I_p}$ |                       |
|-----------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Indice de plasticité        | Type de Sol     | Indice de Consistance                 | Etat de Consistance   | Indice de Liquidité                   | Etat de Consistance   |
| $< 1\%$                     | Pulvérulent     | $I_c \leq 0$                          | Liquide               | $I_L < 0$                             | Très dure             |
| $1\% < I_p < 7\%$           | Sable argileux  | $0 < I_c < 1$                         | Plastique             | $0 < I_L \leq 1$                      | Dure à très plastique |
| $7\% < I_p < 17\%$          | Argile sableuse | $I_c = 1$                             | Plastique Solide      |                                       |                       |
| $> 17\%$                    | Argile          | $I_c > 1$                             | Semi Solide ou Solide | $I_L > 1$                             | Fluide                |

### L'état de compacité des sols pulvérulents en fonction de leur indice de densité

| Etat de compacité du sol grenu | Id     |
|--------------------------------|--------|
| très peu compact               | 0-15   |
| peu compact                    | 15-35  |
| compacité moyenne              | 35-65  |
| compact                        | 65-85  |
| très compact                   | 85-100 |

### Classification des sols

#### Classification des sols selon le diamètre moyen des grains

| Nature du sol  | Grenu (Pulvérulent) |          |            |           | Fins            |           |
|----------------|---------------------|----------|------------|-----------|-----------------|-----------|
|                |                     |          |            |           |                 | Cohérents |
| Type de grains | Cailloux            | Graviers | Gros sable | Sable fin | Limon           | Argile    |
| Ø des grains   | 20 mm               | 2 mm     | 0.2 mm     | 20 µm     | 2 µm            |           |
| Analyse        | Tamisage            |          |            |           | Sédimentométrie |           |

On distingue :

- Sols grenus plus de 50% des éléments solides ont un  $\phi > 80\mu\text{m}$
- Sols fins plus de 50% des éléments solides ont un  $\phi < 80\mu\text{m}$

### Classifications des sols grenus

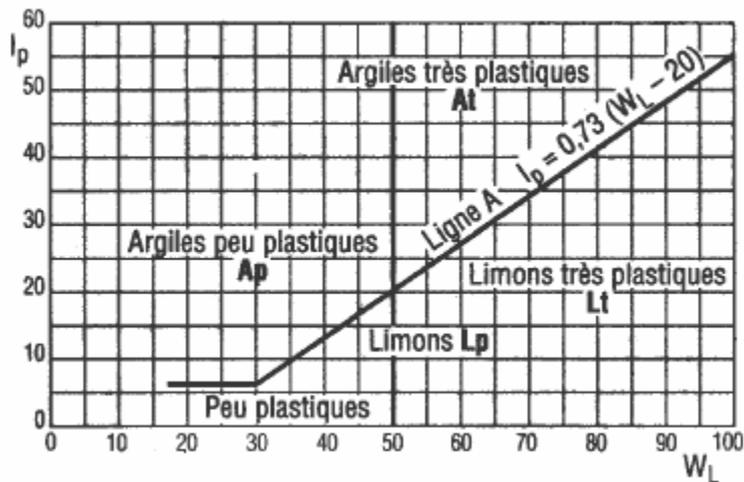
Selon le Laboratoire Central Ponts Et Chaussées LCPC on peut classier les sols comme suit :

### Classification des sols grenus selon le LCPC

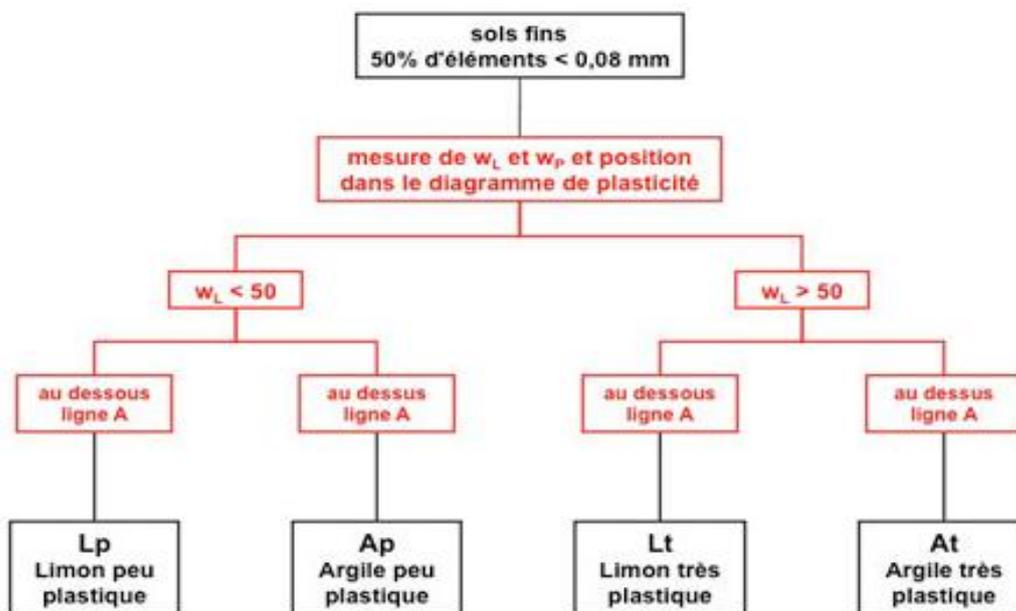
| Plus de 50 % des éléments ont un diamètre > 0,08 mm  |  |                                   |  |  |                        |
|--|--|-----------------------------------|--|--|------------------------|
| Définitions  |  | Symboles                          | Conditions   | Désignation géotechnique                   |                        |
| GRAVES   | Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2mm | Moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm | $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$<br>et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3 | Grave proprebien gradué                    |                        |
|  |  |                                   | Gm   | Une des conditions de Gb non satisfaite    | Grave propremal gradué |
|  |  | Plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm | GL   | Limite d'Atterbergau dessous de la ligne A | Grave limoneuse        |
|  |  |                                   | GA   | Limite d'Atterbergau dessus de la ligne A  | Grave argileuse        |
| SABLES   | Plus de 50% des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2mm | Moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm | $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$<br>et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3 | Sable proprebien gradué                    |                        |
|  |  |                                   | Sm   | Une des conditions de Sb non satisfaite    | Sable propremal gradué |
|  |  | Plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm | SL   | Limite d'Atterbergau dessous de la ligne A | Sable limoneux         |
|  |  |                                   | SA   | Limite d'Atterbergau dessus de la ligne A  | Sable argileux         |
| Lorsque 5 % < % d'éléments inférieur à 0,08 mm < 12 % ⇒ On utilise double Symbole ex : Sb-SL |  |                                   |  |  |                        |

## Classifications des sols fins

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg.



Classification LPC des sols fins en laboratoire. Diagramme de plasticité



## Classification des sols

### Deux méthodes : USCS ET LCPC

Principe de classification ; elles se basent sur les essais de granulométrie (à sec, sous l'eau et sédimentométrie) et les limites d'atterberg  $W_L$  et  $W_P$

**Pour USCS :** on a besoin de deux tamis de références (4.75mm et 75microns) en plus de  $W_L$  et  $W_P$  ou bien  $C_c$  et  $C_u$

Pour LCPC: on a besoin de deux tamis de références (2mm et 80 microns) en plus de  $W_L$  et  $W_P$  ou bien  $C_c$  et  $C_u$

Quelque soit la méthode utilisée il faut se poser trois questions pour classer le sol

Prenons comme exemple la classification LCPC

**1ere question** : S'agit-il d'un sol grossier SG ou sol fin SF ?

Il faut comparer Tc en % et Rc en % en prenant le tamis de référence de **80 microns** (du tableau ou de la courbe granulométrique)

- a) Si Tc est supérieur à Rc il faut aller au digramme de plasticité dit aussi diagramme de casa grande :  $I_p=0.73(W_L-20)$

Si le point M ( $W_L, I_p$ ) est au dessus de la droite c'est argile A si de plus  $W_L$  est supérieur à 50% l'argile est dite tres plastique

Si le point M est en dessous de la droite c'est limon L si de plus  $W_L$  est inferieur à 50% le limon est dit peu plastique

- b) Si Rc est supérieur à Tc on a un sol grossier SG il faut alors se poser la deuxième question

**Deuxième question** : S'agit-il gravier G ou sable S ?

Il faut comparer Tc\* (en %) et Rc(en%) en prenant le tamis de référence de **2 mm**

$$TC^*(2mm)(en\%)=Tc(2mm)(en\%)-Tc(0.08mm)(en\%)$$

- a) Si Rc est supérieur a Tc\* on a un gravier G il faut alors se poser la troisième question  
b) Si Tc\* est supérieur à Rc on a un Sable S il faut alors se poser la

**Troisième question** :il faut voir le pourcentage des inferieur à 80 microns :Tc en %

**On aura 3 cas :**

- a) Tc inferieur à 5% gravier propre ou sable propre il faut calculer Cc et Cu( bien gradué Gb ou Sb)  
b) Tc supérieur à 12 % il faut déterminer Wl et Wp et Ip et tracer  $I_p=0.73(W_L-20)$  équation de la ligne A voir si le point ( $W_L, I_p$ ) est au dessus de la ligne A (GA ou SA) ou en dessous de la ligne ( GA ou SA)  
c) Tc entre 5% et 12 % double symbole

## Partie N° 02 : Classification des sols

### Exercice01 :

On procède au tamisage à sec de 3500 g d'un sable sec, on constate d'abord que la passoire de 12.5 mm ne retient aucune fraction du matériau.

On utilise alors une colonne de six tamis dont l'ouverture intérieure des mailles est respectivement de haut en bas : 5 ; 2 ; 1 ; 0.5 ; 0.2 ; et 0.08 mm.

Les refus des six tamis sont les suivants (de haut en bas) : 217 ; 868 ; 1095 ; 809 ; 444 ; et 39g et le tamisat du dernier tamis recueilli sur le fond qui ferme la colonne est 28g.

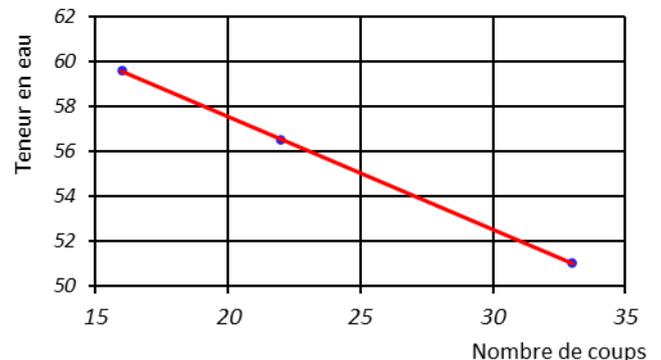
-Déterminer  $C_u$  et  $C_c$ .

### Exercice 02 :

On donne ci-après les résultats bruts d'un essai de détermination de la limite de liquidité, réalisé à l'appareil de Casagrande, sur un échantillon de sol fin inorganique prélevé en dessous de la nappe phréatique, Deux essais de détermination de la limite de plasticité de ce sol ont donné 26,6 et 29 %.

La teneur en eau naturelle du sol est de 75%,

- Déterminer la limite de liquidité de ce sol,
- Dédurre l'indice de plasticité
- Classer ce sol
- Déterminer l'indice de consistance et de liquidité,



### Exercice 03 :

Classer le sol de l'Exercice 1 selon la classification LCPC

### Exercice 04 :

On procède au tamisage à sec de 1000 g d'un sable sec pour terrassement routier, on constate d'abord que la passoire de 12.5 mm ne retient aucune fraction du matériau.

Déterminer  $C_u$  et  $C_c$ .

Trouver la nature du sol

| <b>D tamis (mm)</b> | <b>refus partiel (g)</b> | <b>refus cumulé (g)</b> |
|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| 12,5                | 0                        | 0                       |
| 5                   | 62                       | 62                      |
| 2                   | 248                      | 310                     |
| 1                   | 313                      | 623                     |
| 0,5                 | 231                      | 854                     |
| 0,2                 | 127                      | 981                     |
| 0,08                | 11                       | 992                     |
| fond                | 8                        | 1000                    |

### Exercice 05 :

Le tamisage de 3200g d'un sol inorganique sec donne le résultat suivant avec un fond de 1260 g:

| <b>Mailles du tamis (mm)</b> | 200 | 100 | 50  | 20  | 10  | 5   | 2   | 1   | 0,5 | 0,2 | 0,08 |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| <b>Refus (g)</b>             | 0   | 64  | 416 | 352 | 192 | 128 | 128 | 276 | 160 | 32  | 192  |

- Quels sont les proportions des différents constituants ?
- Aurait-on besoin de déterminer le coefficient d'uniformité  $C_u$  et le coefficient de courbure  $C_c$  pour identifier le sol selon la classification LCPC ? Justifier votre réponse.
- Sachant l'étude de limite d'ATTERBERG ont donné  $w_L = 65\%$  et,  $w_P = 45$ , donner le
- type du sol.

### **Exercice 06 :**

L'analyse granulométrique d'un sol inorganique sec donne les résultats suivants :

|                       |     |    |    |    |    |   |   |     |     |      |
|-----------------------|-----|----|----|----|----|---|---|-----|-----|------|
| Mailles du tamis (mm) | 100 | 50 | 20 | 10 | 5  | 2 | 1 | 0,5 | 0,2 | 0,08 |
| Tamisât (g)           | 98  | 95 | 64 | 30 | 12 | 5 | 4 | 3,5 | 3   | 2,5  |

- ❖ Tracer la courbe granulométrique. Quelles sont les proportions des différents constituants ?
- ❖ Donner la valeur du coefficient d'uniformité et de courbure. Indique le symbole caractéristique de la classification LCPC

### **Exercice 07:**

L'analyse granulométrique d'un sol donne les résultats suivants :

|             |     |      |     |     |     |      |     |     |      |       |      |        |
|-------------|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|-------|------|--------|
| Tamis D(mm) | 20  | 12.5 | 9.5 | 6.3 | 5.6 | 2.8  | 2   | 1.4 | 0.5  | 0.355 | 0.18 | 0.0074 |
| Refus (g°)  | 0.0 | 1.7  | 2.3 | 8.4 | 5.7 | 12.9 | 3.5 | 1.1 | 30.5 | 46.3  | 25.4 | 7.4    |

La masse totale de l'échantillon est de 147,2 g.

On demande de :

1. Tracer la courbe granulométrique.
2. Calculer le coefficient d'uniformité  $C_u$  et le coefficient de courbure du sol  $C_c$ .
3. Donner la classification USCS (Casagrande) de ce sol.

### **Exercice 08 :**

Cherchons la comparaison de la teneur en eau naturelle d'un sol et des limites D'ATTERBERG permet de se faire une idée de l'état d'un argile qu'on peut caractériser par son indice de consistance.

$$I_c = \frac{\omega_l - \omega}{\omega_l - \omega_p}$$

Données :

Lc1=0,19 états plastique, lc2 =1.2 états solide

$W_p=0.37$ ,  $w_p=0.35$ ,  $\gamma_s = 27 \text{ kN/m}^3$ ,  $S_r=1$ ,  $V_t=3\text{m}^3$ ,  $W_s=49.5\text{KN}$ ,

### **Exercice 09:**

Le Tableau ci-dessous résume les résultats d'expériences réalisées sur des échantillons des 3 sols différents :

| Sol | $\omega$ (%) | $\omega_L$ (%) | $\omega_P$ (%) |
|-----|--------------|----------------|----------------|
| 1   | 50           | 46.5           | 21             |
| 2   | 35           | 63             | 21             |
| 3   | 18           | 35             | 18             |

- 1- Classer ces sols selon leurs teneurs en argile.
- 2- Calculer  $I_c$ ,  $I_L$  de chaque sol.

### **Exercice 10:**

Les grandeurs suivantes ont été déterminées pour deux sols X et Y

| Grandeur/sols                     | Sol X | Sol Y |
|-----------------------------------|-------|-------|
| <b>Limite de liquidité</b>        | 0.62  | 0.34  |
| <b>Limite de plasticité</b>       | 0.26  | 0.19  |
| <b>Teneur en eau</b>              | 0.38  | 0.25  |
| <b>Densité des grains solides</b> | 2.71  | 2.67  |
| <b>Degré de saturation</b>        | 1     | 1     |

Lequel de ces deux sols :

1. Contient plus de particules d'argile.
2. A une densité humide plus grande.
3. A une densité sèche plus grande.
4. A un indice des vides plus grand.

Afin de déterminer les limites d'ATTERBERG, des essais ont été réalisés sur la fraction de sol ( $\emptyset < 0,4 \text{ mm}$ ) provenant d'une carrière de la périphérie de Sidi Bel Abbés.

### **Exercice 11 :**

A) Limite de liquidité : 5 essais sont effectués à la coupelle de CASAGRANDE sur des échantillons de 70g à peu près avec des teneurs en eau différents. Après chaque essais, un prélèvement est passé à l'étuve)  $105^\circ\text{C}$  pendant 24h, les résultats sont les suivants :

| N° essai                       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Nombre de coups (g)</b>     | 16    | 21    | 29    | 30    | 35    |
| <b>Masse totale humide (g)</b> | 12,93 | 12,41 | 11,57 | 12,58 | 12,89 |
| <b>Masse totale sec (g)</b>    | 12,04 | 11,57 | 11,07 | 11,84 | 12,11 |
| <b>Masse de la tare (g)</b>    | 8,33  | 8,43  | 8,86  | 8,4   | 8,37  |

B) Limite de plasticité : 3 essais sont réalisés sur des échantillons

Les résultats sont les suivants :

| N° essai                | 1    | 2    | 3    |
|-------------------------|------|------|------|
| Masse totale humide (g) | 23,8 | 9,34 | 23,9 |
| Masse totale sec (g)    | 23,5 | 9,23 | 23,5 |
| Masse de la tare (g)    | 21   | 8,33 | 20,6 |

- Déterminer la limite de liquidité graphiquement et par la formule empirique.
- Déterminer la limite de plasticité.
- Déterminer l'indice de plasticité.
- In situ, le sol a une teneur en eau naturelle égale à 14%. Calculer l'indice de consistance. Que peut-on conclure ?
- En considérant que le sol n'est constitué que de la fraction ( $\phi < 0,4$  mm), identifier ce sol.

### **Exercice 12 :**

un carottage a été effectué sur toute l'épaisseur d'une couche d'argile et les éprouvettes ont permis de déterminer à différentes profondeurs les limites d'Atterberg et la teneur en eau. Les valeurs sont indiquées dans le tableau suivant :

| Z (m)              | 1,5 | 2  | 4  | 5,5 | 6  |
|--------------------|-----|----|----|-----|----|
| w <sub>p</sub> (%) | 35  | 33 | 29 | 20  | 16 |
| w <sub>l</sub> (%) | 52  | 48 | 42 | 36  | 28 |
| w (%)              | 49  | 47 | 45 | 43  | 41 |

- Calculer l'indice de plasticité aux points x données.

Si l'on admet que le sol est saturé sur toute son épaisseur et que la densité spécifique des particules est de 2,6 :

- Calculer l'indice des vides aux profondeurs x données.

## Partie 3 : Compactage des sols

---

## Rappel de cours partie 3: Compactage des sols

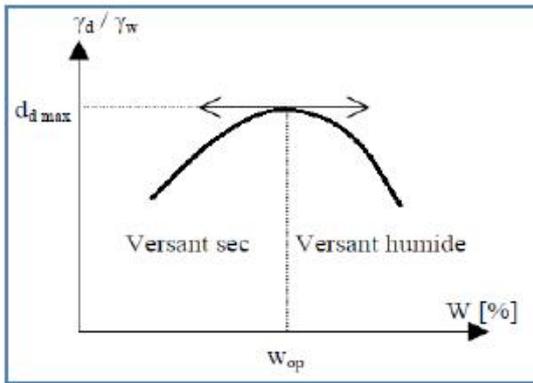
### Théorie du compactage (théorie de Proctor)

Proctor a montré que le compactage est fonction de quatre paramètres : la masse volumique du sol sec, la teneur en eau, l'énergie de compactage et le type de sol (granulométrie, minéralogie,...).

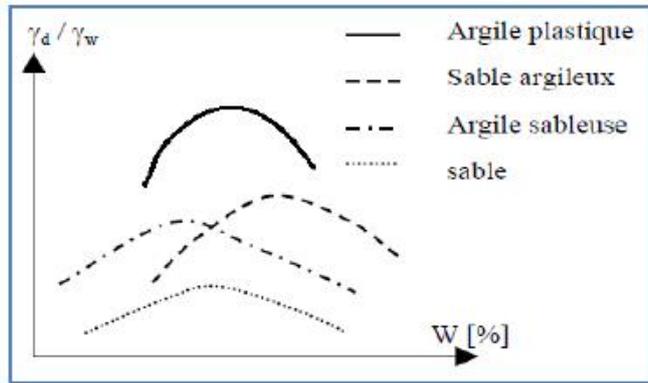
**Les courbes de compactage varient avec la nature du sol** (Fig. 3.2). Elles sont très aplaties pour les sables, qui leur compactage est donc peu influencé par la teneur en eau. Les matériaux de ce genre constituent les meilleurs remblais.

Lorsque **l'énergie de compactage augmente**, le poids volumique optimal s'accroît et la teneur en eau optimale diminue (Fig. 3.3).

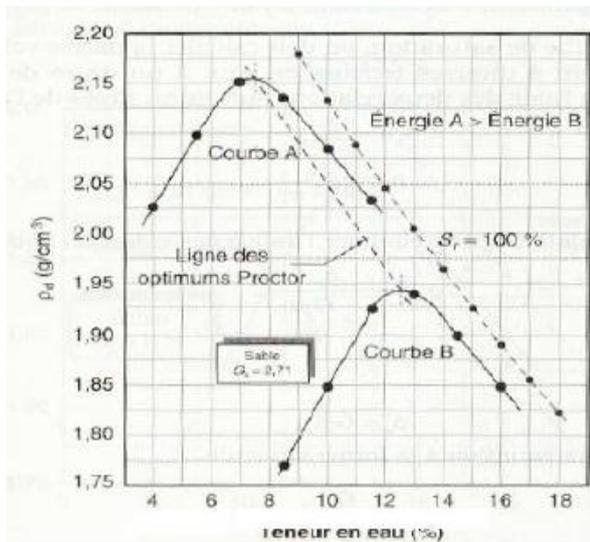
Les courbes de compactage admettent pour enveloppe une courbe appelée **courbe de saturation**, qui correspond à l'état saturé du sol (Fig.3.4).



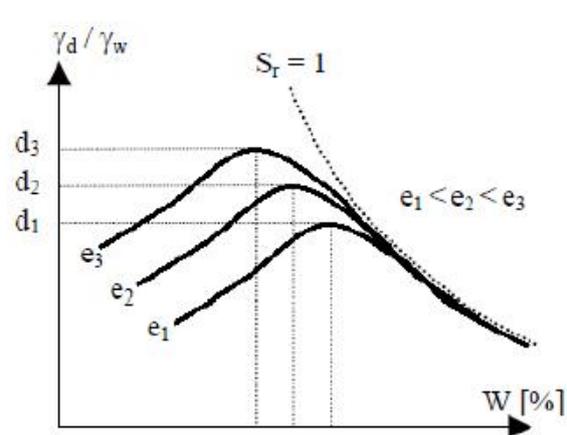
**Fig. 3.1 : Courbe de compactage**



**Fig. 3.2 : Influence du type de sol**



**Fig. 3.4 : Courbe de saturation**



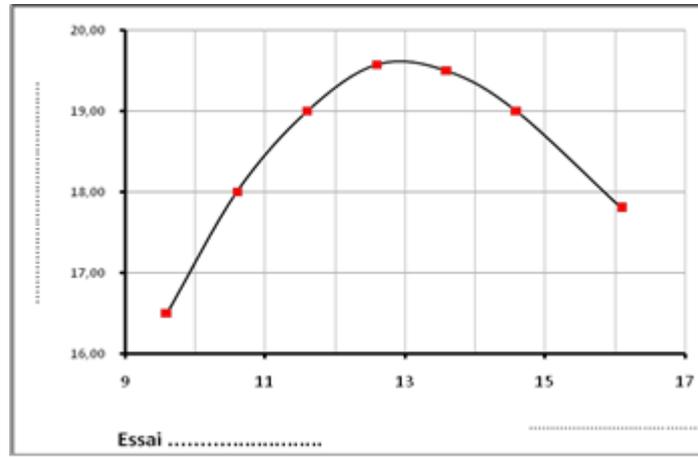
**Fig. 3.3 : Influence de l'énergie de compactage**

### Conditions des essais Proctor normal et Modifié

| <b>Essai Proctor</b> | <b>Masse de la dame (Kg)</b> | <b>Hauteur de chute (cm)</b> | <b>Nombre de coups par couche</b> | <b>Nombre de couches</b> | <b>Energie de compactage Kj/dm<sup>3</sup></b> |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--|
| <b>Normal</b>        | 2,490                        | 30,50                        | 25 (moule Proctor)                | 3                        | 0,59   |
|                      |                              |                              | 55 (moule CBR)                    | 3                        | 0,53   |
| <b>Modifié</b>       | 4,540                        | 45,70                        | 25 (moule Proctor)                | 5                        | 2,71   |
|                      |                              |                              | 55 (moule CBR)                    | 5                        | 2,41   |

## Partie N° 03 : Compactage des sols

### Exercice01 :



- Compléter le graphe ci-dessus : noms des axes etc....
- Donner les noms et les valeurs des coefficients tirés de cette courbe.
- Donner graphiquement les valeurs correspondantes à 18,00 sur l'axe des X.

### Exercice 02 :

Un essai de compactage a été réalisé sur un échantillon de sol et a donné les résultats

|                   |      |      |      |      |      |
|-------------------|------|------|------|------|------|
| Masse de sol (g)  | 2010 | 2092 | 2114 | 2100 | 2055 |
| Teneur en eau (%) | 12.8 | 14.5 | 15.6 | 16.8 | 19.2 |

En sachant que  $G_S = 2.67$  et  $V = 1000 \text{ cm}^3$ , tracer la courbe Proctor. En déduire la densité sèche maximale, la teneur en eau maximale et le degré de saturation.

### Exercice 03 :

Un essai Proctor, effectué sur un sol, a donné les résultats suivants :

|                                    |     |     |      |      |      |     |
|------------------------------------|-----|-----|------|------|------|-----|
| La teneur en eau (%)               | 12  | 13  | 15   | 16,8 | 18   | 20  |
| Masse de l'échantillon humide (kg) | 1,7 | 1,8 | 1,95 | 1,95 | 1,88 | 1,8 |

- Tracer la courbe Proctor, en déduire  $\omega_{opt}$  et  $\gamma_{dmax}$ .

### Exercice 04 :

Enoncé : Un sol est compacté dans un moule cylindrique avec un volume de  $1000 \text{ cm}^3$  à six niveaux d'eau différents, en utilisant la même énergie de compactage. Après le compactage, des échantillons ont été prélevés et pesés.

Les teneurs en eau et les masses humides des échantillons sont données dans le tableau ci-dessous.

|                         |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
| <b>Teneur en eau %</b>  | 11   | 13   | 15   | 17   | 19   | 21   |
| <b>Masse humide (g)</b> | 1867 | 1956 | 2044 | 2106 | 2090 | 2036 |

1. Tracer la courbe Proctor,
2. Déterminer le poids volumique maximal du sol sec et la teneur en eau optimale.
3. Dans quel domaine de teneur en eau doit-on compacter pour que  $\gamma_d > 0.95\gamma_{d(\text{optimum})}$ .
4. Si le sol utilisé comme remblai a une teneur en eau lors du transport par camion de l'ordre de 8.5% et un poids volumique des grains solides est de  $\gamma_s = 27 \text{ kN/m}^3$ , Combien de litres d'eau devrait-on ajouter à ce sol pour compacter les  $25000 \text{ m}^3$ , sachant que le sol est compacté à l'optimum Proctor.

### Exercice 05 :

Les résultats d'un essai de compactage Proctor normal sont donnés dans le tableau suivant :

| <b>Volume de moule<br/>(<math>\text{mm}^3</math>)</b> | <b>Masse humide du sol dans le moule<br/>(kg)</b> | <b>Teneur en eau<br/>(%)</b> |
|---|---|------------------------------|
| 943895  | 1.65  | 10                           |
| 943895  | 1.75  | 12                           |
| 943895  | 1.82  | 14                           |
| 943895  | 1.81  | 16                           |
| 943895  | 1.75  | 18                           |
| 943895  | 1.69  | 20                           |

1. Construire la courbe de compactage Proctor et déterminer les caractéristiques de l'optimum.
2. Calculer le degré de saturation correspondant à l'optimum Proctor. On prendra  $\gamma_n / \gamma_w = 2.65$ .
3. Calculer le pourcentage d'air qui contient un sol de porosité  $n$  et de degré de saturation  $S_r$ .

4. En supposant que l'échantillon de l'essai a une teneur en eau de 16% et un volume initial de  $950 \text{ m}^3$ , quelle est la quantité d'eau à ajouter pour l'amener, à la saturation ?
5. Si cet échantillon est prélevé d'un dépôt distant de 20 km du chantier, quelle est la quantité d'eau qu'il faudra transporter vers le chantier pour avoir un remblai de  $100.000 \text{ m}^3$  compacté dans des conditions optimales.

### **Exercice 06 :**

L'essai Proctor modifié réalisé sur un échantillon du sol a donné les résultats suivants :

- Mesure de la masse volumique humide :
  - Masse du moule  $m = 4353 \text{ g}$
  - Volume du moule  $V = 942 \text{ cm}^3$

|  |      |       |      |       |      |
|--|------|-------|------|-------|------|
| <b>Teneur en eau estimée (%)</b>                                 | 9    | 10,50 | 12   | 13,50 | 15   |
| <b>Masse du moule + Masse du sol humide <math>M_h</math> (g)</b> | 6289 | 6336  | 6366 | 6390  | 6384 |

- Mesure de la teneur en eau réelle

|  |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Récipient</b>                             | B7     | A8     | B14    | B8     | B2     |
| <b>Masse du récipient (g)</b>                | 206,4  | 194,0  | 211,5  | 206,9  | 210,2  |
| <b>Masse du (récipient + sol humide) (g)</b> | 1228,8 | 1118,3 | 1342,4 | 1201,4 | 1211,2 |
| <b>Masse (récipient + sol sec) (g)</b>       | 1142,7 | 1029,7 | 1029,8 | 1090,9 | 1088,3 |

Sachant que le sol a une densité de 2,70 :

1. Tracer la courbe de compactage.
2. Tracer les courbes de saturation de 90% et 100%.
3. En déduire les valeurs de l'optimum Proctor.
4. Déterminer le degré de saturation à l'optimum Proctor.
5. Calculer le volume de l'air à la saturation.

# Solutions Partie 1 :

## Propriétés physiques des sols

---

## Solution Partie N° 01 : Propriétés physiques des sols

### EXERCICE 01 :

1/L'indice des vides et le poids volumique de l'échantillon saturé :

$$S_r = 100\%, w = 19\%$$

$$\frac{\gamma_s}{\gamma_w} = 2.6 \rightarrow e = \frac{w}{S_r} \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = 0.19 * 2.6 = 0.494$$

$$e = 0.494$$

Poids volumique de l'échantillon

$$\gamma = (1+w) \gamma_d$$

$$\gamma_s = (1+e) \gamma_d \rightarrow$$

$$\gamma = \frac{1+w}{1+e} \gamma_s$$

$$\gamma = \frac{1+0.19}{1+0.494} * 26 = 20.7 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma = 20.71 \text{ kN/m}^3$$

2/ poids des grains solides

$$\omega = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M - M_s}{M_s}$$

$$M_s = \frac{M}{1+w} = \frac{155}{1+0.19} = 130.25 \text{ g}$$

Poids des grains solides

$$P_s = M_s \times g = 130.25 * 10^{-3} * 10 = 1.30 \text{ N}$$

$$P_s = 1.30 \text{ N}$$

3/ volume de l'air

$$V_a = V_v - V_w$$

Echantillon saturé  $V_v = V_w \rightarrow$

$$V_a = 0 \rightarrow \text{le \% de l'air} = 0\%$$

### EXERCICE 02 :

1/ la teneur en eau « $\omega$ » :

$$W = \frac{M_w}{M_s} * 100 = \frac{m_T - m_s}{m_s} * 100$$

$$W = \frac{130 - 122}{122} = 6.55\%$$

2/ l'indice des vides

$$W = \frac{V_v}{V_s} * 100$$

$$V_v = V_T - V_s$$

$$V_s = \frac{M_s}{\gamma_s} = \frac{M_s}{G_s \cdot \delta_w} = \frac{122}{2.65 \cdot 1} = 46.03 \text{ cm}^3$$

$$V_v = V_T - V_s = 56.4 - 46.03 \text{ cm}^3 = 10.37 \text{ cm}^3$$

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$e = (10.37/46) = 0.225$$

### 3/ le degré de saturation « Sr »

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} * 100,$$

$$\gamma_w = \frac{M_w}{V_w} \rightarrow V_w = \frac{M_w}{\gamma_w}$$

$$M_w = M_T - M_s = 8 \text{ g}$$

$$V_w = 8/1 = 8 \text{ cm}^3$$

$$S_r = (8/10.37) * 100 = 77.14\%$$

## **EXERCICE 03 :**

1/le poids volumique sec :  $\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e}$

$$\gamma_d = 18.62 \text{ kN/m}^3$$

2/le poids volumique humide :  $\gamma = (1 + \omega)\gamma_d$

$$\gamma = 20.85 \text{ kN/m}^3$$

3/la teneur en eau à la saturation :  $\omega_{sat} = e s_r \gamma_w / \gamma_s$

$$\omega = 16.66\%$$

4/le poids volumique à la saturation :  $\gamma_{sat} = (1 + \omega)\gamma_d = 21.72 \text{ kN/m}^3$

## **EXERCICE 04:**

1a) La masse volumique humide de l'échantillon  $\rho_h$

$$\Rightarrow \rho_h = \frac{\text{Masse de l'échantillon humide}}{\text{Volume total de l'échantillon}} = \frac{M_T}{V_T}$$

1b) Le poids volumique de l'échantillon  $\gamma_h$

$$\Rightarrow \gamma_h = \rho_h g$$

❖ Application numérique :

$$M_T = 2350 \text{ kg} ; V_T = 1,20 \text{ m}^3 ; g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$\Rightarrow \rho_h = \frac{2350}{1,20} = 1958,30 \text{ kg/m}^3$$

$$\Rightarrow \gamma_h = 1958,30 \times 10 = 19583 \text{ N/m}^3$$

$$\gamma_h = 19,583 \text{ kN/m}^3$$

2a) La masse volumique du sol sec ( $\rho_d$ )

$$\rho_d = \frac{\text{Masse du sol sec}}{\text{Volume total de l'échantillon}} = \frac{M_s}{V}$$

Connaissant la masse volumique totale ( $\gamma_h$ ) et la teneur en eau ( $\omega$ ), on utilisera les relations entre les paramètres pour déterminer la masse volumique du sol sec ( $\gamma_d$ ) :

$$\Rightarrow \gamma_d = \frac{\gamma_h}{1+\omega}$$

2b) Le poids volumique du sol sec ( $\gamma_d$ )  $\Rightarrow \gamma_d = \rho_h g$

❖ Application numérique :

$$\gamma_h = 1958,30 \text{ kg/m}^3 ; w = 8,60\% ; g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$\Rightarrow \gamma_d = \frac{1958,30}{1+0,086} = 1803,22 \text{ kg/m}^3$$

$$\Rightarrow \gamma_d = 1803,22 \times 10 = 18032,20 \text{ N/m}^3$$

$$\gamma_d = 18,03 \text{ kN/m}^3$$

3a) Indice des vides ( $e$ )  $\Rightarrow e = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume des grains}} = \frac{V_v}{V_s}$

Connaissant le poids volumique du sol sec ( $\gamma_d$ ) et le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), il existe une relation entre ( $e$ ), ( $\gamma_d$ ) et ( $\gamma_s$ ) :  $\Rightarrow e = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d}$

3b) Porosité ( $n$ )  $\Rightarrow n = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total}} = \frac{V_v}{V_t}$

Connaissant l'indice des vides ( $e$ ), il existe une relation entre ( $e$ ) et la porosité ( $n$ ) :

$$\Rightarrow n = \frac{e}{e+1}$$

❖ Application numérique

$$\gamma_s = 27,10 \text{ kN/m}^3 ; \gamma_d = 18,03 \text{ kN/m}^3$$

$$\Rightarrow e = \frac{27,10 - 18,03}{18,03} = 0,503$$

$$\Rightarrow n = \frac{0,503}{1+0,503} = 0,334$$

4) Le volume d'eau dans l'échantillon  $M_w \Rightarrow V_w = \frac{M_w}{\gamma_w}$

La masse de l'eau ( $M_w$ ) s'obtient par différence de la masse totale de l'échantillon et de la masse des grains solides, soit :  $\Rightarrow M_w = M_T - M_S$

La masse de l'échantillon a pour valeur :  $M_T = 2350 \text{ kg}$

La masse constituant solide des grains est de :  $M_S = \gamma_d V$

$$\Rightarrow M_w = M_T - M_S = M_w = M_T - \rho_d V$$

❖ Application numérique

$$M_T = 2350 \text{ kg} ; V_T = 1,20 \text{ m}^3 ; \gamma_d = 1803,22 \text{ kg/m}^3 ; \gamma_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\Rightarrow M_w = 2350 - 1803,22 \times 1,20 = 186,4 \text{ kg}$$

$$\Rightarrow V_w = \frac{186,4}{1000} = 0,1864 \text{ m}^3$$

5) Le pourcentage ( $T_a$ ) du volume d'air contenu dans l'échantillon  $\Rightarrow T_a(\%) = \frac{\text{Volume d'air}}{\text{Volume total}} = \frac{V_a}{V}$

Le volume de l'air contenu dans l'échantillon ( $V_a$ ) s'obtient par différence du volume total et des volumes des grains solides et de l'eau :  $\Rightarrow V_a = V_T - V_S - V_w$

La masse du constituant solide des grains est de :  $\Rightarrow M_S = \gamma_d V$

Le volume des grains solides :  $\Rightarrow V_S = \frac{M_S}{\gamma_s}$

❖ Application numérique :

$$V_T = 1,20 \text{ m}^3 ; \gamma_d = 18,03 \text{ kN/m}^3 ; \gamma_s = 27,10 \text{ kN/m}^3 ; g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$\Rightarrow M_S = 18,03 \times 1,20 = \boxed{21,63 \text{ kN}}$$

$$\Rightarrow V_S = \frac{21,63}{27,10} = \boxed{0,7981 \text{ m}^3}$$

$$\Rightarrow V_a = 1,20 - 0,7981 - 0,1864 = \boxed{0,2151 \text{ m}^3}$$

$$T_a(\%) = \frac{0,2151}{1,20} = \boxed{17,92\%}$$

6) Degré de saturation  $S_r$ :

Le degré de saturation s'obtient par la formule :  $\Rightarrow S_r(\%) = \frac{\text{Volume de l'eau}}{\text{Volume des vides}} = \frac{V_w}{V_v}$

$$\Rightarrow S_r(\%) = \frac{w \gamma_s}{e \gamma_w}$$

❖ Application numérique

$$V_a = 0,2151 \text{ cm}^3 ; V_w = 0,1864 \text{ cm}^3 ; e = 0,503 ; w = 8,60\% ; G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = 2,71$$

$$\Rightarrow S_r(\%) = \frac{0,1864}{0,1864 + 0,2151} = \boxed{46,412\%}$$

$$\Rightarrow S_r(\%) = \frac{0,086 \cdot 27,1}{0,503 \cdot 10} = \boxed{46,33\%}$$

7) Teneur en eau de saturation  $W_{\text{sat}}$  :

Lorsque le sol est saturé en eau, tous les vides sont occupés par de l'eau. Dans ce cas le degré de saturation est égal à :  $S_r = 100\%$

En utilisant la relation :  $\Rightarrow S_r(\%) = \frac{w \gamma_s}{e \gamma_w}$

Dans le cas d'un sol saturé ( $S_r = 100\% = 1$ ), cette relation devient :  $\Rightarrow \omega_{\text{sat}} = e \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$

❖ Application numérique :

L'indice des vides ( $e = V_v/V_s$ ) ne change pas :

$$e = 0,503 \frac{\gamma_w}{\gamma_s} = \frac{10}{27,1} \Rightarrow \omega_{\text{sat}}(\%) = 0,503 \frac{10}{27,1} = \boxed{18,56\%}$$

8) Masse volumique du sol saturé  $\rho_{\text{sat}}$  :

$$\rho_h = (1+w)\rho_d \rightarrow \rho_{\text{sat}} = (1+W_{\text{sat}})\rho_d$$

❖ Application Numérique:

$$W_{\text{sat}} = 18,56\% \quad \gamma_d = 18,03 \text{ kN/m}^3$$

$$\Rightarrow \gamma_{\text{sat}} = (1 + 0,1856) 18,03 = \boxed{2138 \text{ kN/m}^3}$$

## EXERCICE 05:

1) Démonstration  $\gamma_{\text{sat}} = \gamma_d + n \cdot \gamma_w$ :

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{\text{Poids de l'échantillon saturé}}{\text{Volume total de l'échantillon}} = \frac{W_T}{V_T}$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{\text{Poids des grains solides} + \text{Poids de l'eau}}{\text{Volume total de l'échantillon}} = \frac{W_s + W_w}{V_T}$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{W_s}{V_T} + \frac{W_w}{V_T} \Rightarrow \gamma_{\text{sat}} = \gamma_d + \frac{\gamma_w V_w}{V_T} \quad (1)$$

Le sol est saturé : le volume de l'eau ( $V_w$ ) est égal au volume des vides ( $V_v$ ) :

$$\Rightarrow V_w = V_v \Rightarrow \frac{V_w}{V_T} = \frac{V_v}{V_T} = n \quad (2)$$

En injectant (2) dans (1) on obtient:  $\Rightarrow \gamma_{\text{sat}} = \gamma_d + n \cdot \gamma_w$

2) La masse volumique du sol sec  $\rho_d$

On utilisera la relation qui existe entre le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), le poids volumique du sol sec ( $\gamma_d$ ) et l'indice des vides ( $e$ ) :

$$\Rightarrow e = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \quad \gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} \quad (1)$$

On utilisera la relation qui existe entre la porosité ( $n$ ) et l'indice des vides ( $e$ ) :

$$\Rightarrow e = \frac{n}{1-n} \quad (2)$$

En injectant (2) dans (1) on obtient :  $\Rightarrow \gamma_d = \gamma_s (1-n) \Rightarrow n = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s} \quad (3)$

D'autre part, nous avons :  $\Rightarrow \gamma_{\text{sat}} = \gamma_d + n \cdot \gamma_w \quad (4)$

En injectant (3) dans (4) on obtient :  $\Rightarrow \gamma_d = \frac{\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \gamma_s \Rightarrow \rho_d = \frac{\rho_{\text{sat}} - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \rho_s$

❖ Application numérique :

$$\gamma_{\text{sat}} = 19.50 \text{ kN/m}^3 \quad ; \quad \gamma_s = 26.50 \text{ kN/m}^3$$

$$\Rightarrow \gamma_d = \frac{19.50 - 10}{26.50 - 10} 26.50 = \boxed{15.25 \text{ kN/m}^3}$$

## EXERCICE 06:

1) Le poids volumique du sol sec ( $\gamma_d$ )  $\Rightarrow \gamma_d = \frac{\text{Masse du sol sec}}{\text{Volume total de l'échantillon}} = \frac{M_s}{V}$

Connaissant la masse volumique totale ( $\rho_h$ ) et la teneur en eau ( $\omega$ ), on utilisera les relations entre les paramètres pour déterminer la masse volumique du sol sec ( $\gamma_d$ ) :

$$\Rightarrow \gamma_d = \frac{\gamma_h}{1+\omega}$$

❖ Application numérique :

$$\gamma_h = 1,90 \text{ g/cm}^3 \quad ; \quad \omega = 12\%$$

$$\Rightarrow \gamma_d = \frac{1,90}{1+0,12} = \boxed{1,70 \text{ g/cm}^3}$$

2) Indice des vides ( $e$ )  $\Rightarrow e = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume des grains}} = \frac{V_v}{V_s}$

Connaissant le poids volumique du sol sec ( $\gamma_d$ ) et le poids volumique des grains solides ( $\gamma_s$ ), il existe une relation entre ( $e$ ), ( $\gamma_d$ ) et ( $\gamma_s$ ) :  $\Rightarrow e = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d}$

3) Porosité ( $n$ )  $\Rightarrow n = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total}} = \frac{V_v}{V_T}$

Connaissant l'indice des vides ( $e$ ), il existe une relation entre ( $e$ ) et la porosité ( $n$ ) :

$$\Rightarrow n = \frac{e}{e+1}$$

❖ Application numérique

$$\gamma_d = 1,70 \text{ g/cm}^3 ; \Rightarrow G_s = 2,85 \text{ g/cm}^3 ; \gamma_w = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\Rightarrow e = \frac{2,85-1,70}{1,70} = \boxed{0,68}$$

$$\Rightarrow n = \frac{0,68}{1+0,68} = \boxed{0,405}$$

$$4) \text{ Degré de saturation } S_r : \Rightarrow S_r(\%) = \frac{\text{Volumedel'eau}}{\text{Volumedesvides}} = \frac{V_w}{V_v}$$

$$\text{Le degré de saturation s'obtient par la formule : } \Rightarrow S_r(\%) = \frac{W}{e} \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

❖ Application numérique

$$e = 0,68 ; \omega = 12\% ; G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = 2,85$$

$$\Rightarrow S_r(\%) = \frac{0,12}{e} \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \boxed{50,30\%}$$

5) Teneur en eau de saturation  $\omega_{\text{sat}}$  :

Lorsque le sol est saturé en eau, tous les vides sont occupés par de l'eau. Dans ce cas le degré de saturation est égale à :  $S_r = 100\%$

$$\text{En utilisant la relation } \Rightarrow S_r(\%) = \frac{\omega}{e} \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

Dans le cas d'un sol saturé ( $S_r = 100\% = 1$ ), cette relation devient :  $\Rightarrow \omega_{\text{sat}}(\%) = e \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$

❖ Application numérique

L'indice des vides ( $e = V_v/V_s$ ) ne change pas :

$$e = 0,68 ;$$

$$\Rightarrow \omega_{\text{sat}}(\%) = 0,68 \times 0,351 = \boxed{23,86\%}$$

6) Masse volumique ou le poids volumique du sol saturé  $\gamma_{\text{sat}}$  :

$\omega_{\text{sat}}$

$$\gamma_h = (1 + w) \gamma_d \rightarrow \gamma_{\text{sat}} = (1 + \omega_{\text{sat}}) \gamma_d$$

❖ Application numérique

$$W_{\text{sat}} = 23,86\% ; \gamma_d = 1,70 \text{ g/cm}^3$$

$$\Rightarrow \rho_{\text{sat}} = (1 + 0,2386) 1,70 = \boxed{2,105 \text{ g/cm}^3}$$

## EXERCICE 07:

**Solution :**

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

$$\begin{aligned} n &= \frac{V_v}{V} = \frac{V_v/V_s}{V/V_s} = \frac{e}{\frac{V_s + V_v}{V_s}} = \frac{e}{\frac{V_s}{V_s} + \frac{V_v}{V_s}} \\ &= \frac{e}{1 + e} \end{aligned}$$

- $\gamma_h = \frac{1 + \omega}{1 + e} \gamma_s$

$$\begin{aligned} \gamma_h &= \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{\frac{W_s + W_w}{W_s}}{\frac{V}{W_s}} \\ &= \frac{1 + \omega}{\frac{V_s + V_v}{W_s}} \\ &= \frac{1 + \omega}{\frac{V_s}{W_s} + \frac{V_v}{W_s}} \\ &= \frac{(1 + \omega)}{\left(\frac{V_s}{W_s} + \frac{V_v}{W_s}\right)} \times \frac{\frac{W_s}{V_s}}{\frac{W_s}{V_s}} \\ &= \frac{1 + \omega}{\frac{W_s}{W_s} + \frac{V_v}{V_s}} \gamma_s \\ &= \frac{1 + \omega}{1 + e} \gamma_s \end{aligned}$$

- $\gamma_d = (1 - n) \gamma_s$

$$\begin{aligned} \gamma_d &= \frac{W_s}{V} = \frac{W_s/V_s}{V/V_s} = \frac{W_s}{V_s} \cdot \frac{V_s}{V} \\ &= \frac{W_s}{V_s} \cdot \frac{V - V_v}{V} \\ &= \frac{W_s}{V_s} \left( \frac{V}{V} - \frac{V_v}{V} \right) \end{aligned}$$

$$= \frac{W_s}{V_s} (1 - n)$$

$$= \gamma_s (1 - n)$$

- $\gamma_h = (1 - n)\gamma_s + nS_r \cdot \gamma_w$

$$\gamma_h = \frac{W}{V} = \frac{W_s}{V} + \frac{W_w}{V}$$

$$= \frac{W_s/V}{V/V_s} + \frac{W_w}{V} = \frac{W_w/V_w}{V/V_w}$$

$$= \gamma_s \frac{V_s}{V} + \gamma_w \frac{V_w}{V}$$

$$= \gamma_s \frac{V - V_v}{V} + \gamma_w \frac{V_w V_r}{V V_r}$$

$$= \gamma_n (1 - n) + \gamma_w S_r \cdot n$$

- $w = \frac{S_r \cdot \gamma_w}{\gamma_s} \cdot e$

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W_w/V_s}{W_s/V_s} = \frac{W_w/V_s}{\gamma_s} = \frac{V_w}{V_w} \cdot \frac{W_w}{V_s}$$

$$= \frac{\gamma_w \frac{V_w}{V_s}}{\gamma_s}$$

$$= \frac{\gamma_w \frac{V_w V_r}{V_s V_r}}{\gamma_s}$$

$$= \frac{\gamma_w S_r \cdot e}{\gamma_s}$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = 1$$

$$\Rightarrow V_w = V_v$$

- $e = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$  pour unsaturé

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v \cdot W_s}{V_s \cdot W_s} = \frac{V_v}{W_s} \cdot \gamma_s = \gamma_s \cdot \frac{V_v W_w}{W_s W_w}$$

$$= \frac{\gamma_s W}{\gamma_w}$$

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

$$\begin{aligned} \gamma' &= \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = (\gamma_s(1 - n) + \gamma_{\text{wn}}) - \gamma_w \\ &= \gamma_d - \gamma_w(1 - n) \\ &= \gamma_d \left( 1 - \frac{\gamma_w(1 - n)}{\gamma_d} \right) \\ &= \gamma_d \left( 1 - \frac{\gamma_w(1 - n)}{\gamma_s(1 - n)} \right) \\ &= \gamma_d \left( 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right) = \gamma_d \left( \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \right) \end{aligned}$$

### EXERCICE 08:

$$m_h = 1526g \quad m_s = 1053g \quad m_w = m_h - m_s = 473g$$

➤ Teneur en eau:  $\omega = \frac{m_w}{m_s} = \frac{473}{1053} \times 100 = \boxed{44,92\%}$

➤ Indice des vides:  $e = \frac{\omega \gamma_s}{S_r \cdot \gamma_w} = \frac{0,4492 \cdot 27}{1,10} = \boxed{1,213}$

➤ Porosité:  $n = \frac{e}{1+e} = \boxed{0,55}$

➤ Poids volumique apparent:  $\gamma = \frac{(1+\omega)}{(1+e)} \cdot \gamma_s = \boxed{17,68 \text{ kN/m}^3}$

➤ Poids volumique sec:  $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+\omega} = \boxed{1320 \text{ kN/m}^3}$

### EXERCICE 09:

1. La teneur en eau initiale ( $\omega_i$ )

$$\left. \begin{aligned} S_r &= \frac{W_i \gamma_s}{e \gamma_w} \\ e &= \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega_i = S_r \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \right) \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$$

❖ Application numérique

$$\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3 ; \gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3 ; \gamma_s = 27 \text{ kN/m}^3 ; S_r = 40\%$$

$$\Rightarrow W_i = 0,40 \left( \frac{27}{15} - 1 \right) \frac{10}{27} = \boxed{11,85\%}$$

2. Augmentation du degré de saturation ( $\Delta S$ ), après compactage.

Après compactage, le poids volumique de sol augmente de 20% :  $\Rightarrow \gamma_{\text{dcomp}} = \gamma_d + 0,20 \gamma_d = 1,20 \gamma_d$

D'où l'indice des vides du sol compacté ( $e_{\text{comp}}$ ) :  $\Rightarrow e_{\text{comp}} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{\text{dcomp}}} - 1$

Et le degré de saturation du sol compacté ( $S_{r(\text{comp})}$ ) :  $\Rightarrow S_{r\text{comp}} = \frac{W}{e_{\text{comp}}} \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$

Le degré de saturation du sol compacté est :

La teneur en eau ( $w$ ) reste constante lors du compactage

$$\left. \begin{array}{l} W = W_i \\ S_{r\text{comp}} = \frac{W_i}{e_{\text{comp}}} \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \\ e_{\text{comp}} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{\text{dcomp}}} - 1 \\ \gamma_{\text{dcomp}} = 1,20\gamma_d \end{array} \right\} \Rightarrow S_{r\text{comp}} = \frac{W_i}{\left(\frac{\gamma_s}{1,20\gamma_d} - 1\right) \gamma_w}$$

❖ Application numérique

$\gamma_d = 15 \text{ kN/m}^3$  ;  $\gamma_s = 27 \text{ kN/m}^3$  ;  $W_i = 11,85\%$  ;  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$

$$\Rightarrow S_{r\text{comp}} = \frac{0,1185}{\left(\frac{27}{1,20 \times 15} - 1\right)} \frac{27}{10} = \boxed{66,36\%}$$

L'augmentation du degré de saturation ( $\Delta S_r = S_{r\text{comp}} - S_r$ ) est :

$$\Rightarrow \Delta S_r = 66,36 - 40 = \boxed{26,36\%}$$

## Solution partie 02 : classification des sols

# Solutions Partie 2 : Classification des sols

---

### **EXERCICE N°1 :**

Déterminer  $C_u$  et  $C_c$

| D(mm) | $R_p$ (g) | $R_c$ (g) | $R_c\%$ | $T_c\%$ |
|-------|-----------|-----------|---------|---------|
| 10    | 0         | 0         | 0       | 100     |
| 5     | 217       | 217       | 6       | 94      |
| 2     | 868       | 1085      | 31      | 69      |
| 1     | 1095      | 2180      | 62      | 38      |
| 0.5   | 804       | 2989      | 85      | 15      |
| 0.2   | 444       | 3433      | 98      | 2       |
| 0.08  | 39        | 3472      | 99      | 1       |
| fond  | 28        | 3500      | 100     | 0       |

Reste dans le **FOND** : 28g donc le total  $3472+28=3500g$

Dans le passoir d'ouverture= 12.5 mm  $a=D/12.5$  donc  $12.5/1.25=10mm$

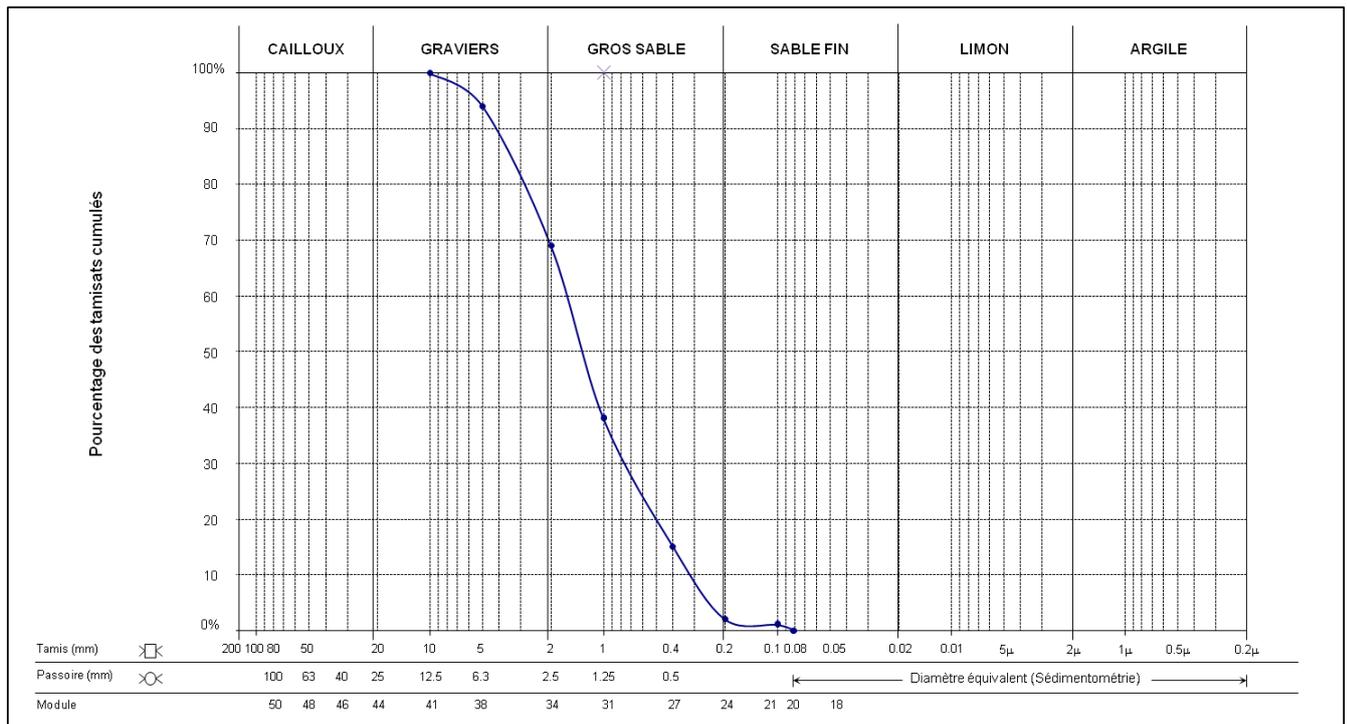
Exemple de calcul :

3500g  $\longrightarrow$  100%

$R_c$ 1g  $\longrightarrow$  x

$$100\% = R_c\% + T_c$$

Détermination de  $C_u$  et  $C_c$  :



On a comme donné de la courbe :

- $D_{10}=0.4$
- $D_{30}=0.9$
- $D_{60}=1.6$

Coefficient de courbure

$$C_u = D_{60}/D_{10} = 1.6/0.4 = 4$$

Coefficient d'uniformité

$$C_c = D_{30}^2/D_{60}D_{10} = 1.26$$

## EXERCICE N°2 :

- Déterminer la limite de liquidité de ce sol :

D'après le graphe la limite de liquidité a 25coups  $W_{10} = 55\%$

- Déduire l'indice de plasticité :

$$I_p = W_{10} - W_p$$

$$W_p = 26.6 + 29/2 = 27.8\%$$

$$\text{Donc } I_p = 55 - 27.8 = 27.2$$

- Classer ce sol

D'après le diagramme de plasticité

On un **limon peu plastique**

- Déterminer l'indice de consistance et de liquidité :

$$I_c = W1 - W/I_p = 0.76$$

- Déterminer l'indice de liquidité :

$$I_l = 1 - I_c = 0.26$$

### **EXERCICE N°3 :**

Classer le sol de l'Exercice 1 selon la classification LCPC

La classification LCPC se fait par deux tamis de références (2mm et 80Mm)

**1ere question** : S'agit-il d'un sol grossier SG ou sol fin SF ?

tamis 80Mm ( $R_c\%=99\%$ ,  $T_c\%=1\%$ ) implique que  $R_c > T_c$  donc on a un sol grossier

**Deuxième question** : S'agit-il gravier G ou sable S ?

tamis 2mm ( $R_c\% = 31\%$ ,  $T_c\% = 69\%$ ) on calcul

$$TC^*(2mm)(en\%) = T_c(2mm)(en\%) - T_c(0.08mm)(en\%)$$

$$T_c^* = 69 - 1 = 68\%$$

$R_c = 31\%$  et  $T_c^* = 68\%$  Donc  $T_c^* > R_c$  un sable

**Troisième question** : il faut voir le pourcentage des inférieurs à 80 microns :  $T_c$  en %

$T_c = 1\% < 5\%$  Sable propre

Il faut chercher  $C_c$  et  $C_u$

Coefficient de courbure

$$C_u = D_{60}/D_{10} = 1.6/0.4 = 4$$

Coefficient d'uniformité

$$C_c = D_{30}^2/D_{60}D_{10} = 1.26$$

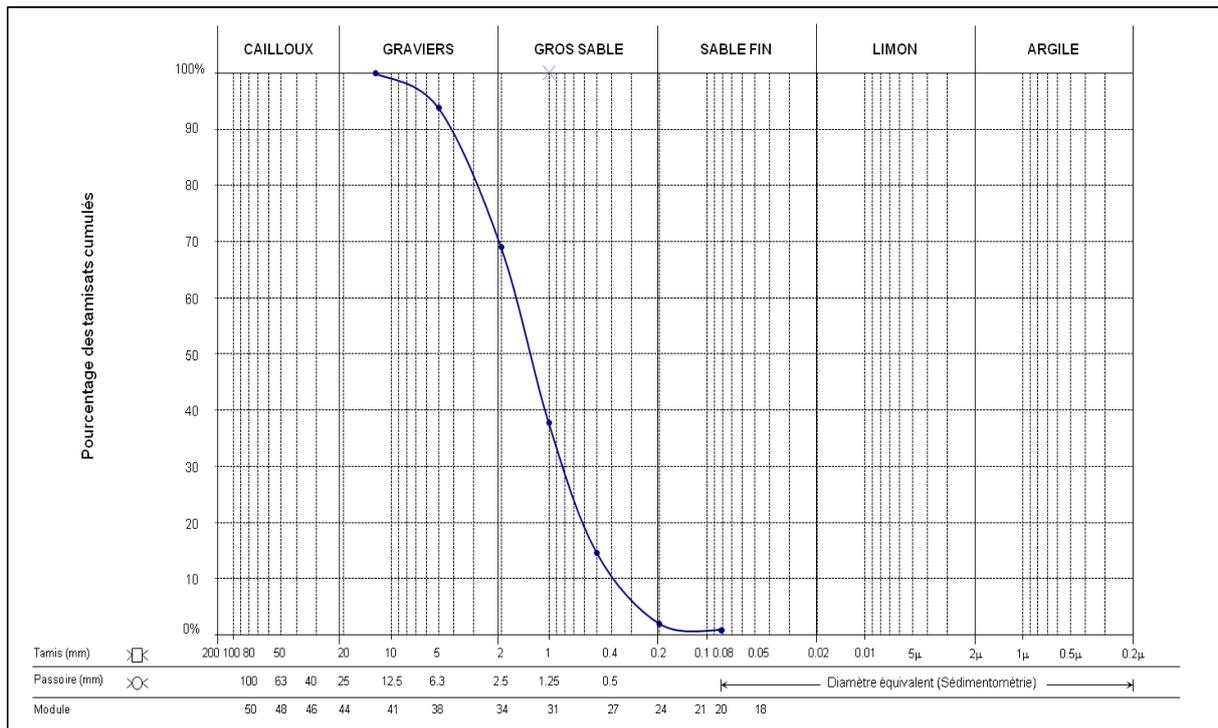
Donc  $1 \leq C_c \leq 3$  et  $C_u \geq 4$  Donc un sol : *sable propre bien graduée*

### **EXERCICE N°4 :**

Traçage de la courbe granulométrique

$$\text{Calcul de } R_c\% = \text{refus cumulé} \times 100 \quad R_c\% = \frac{R_c \times 100}{P}$$

| D tamis (mm) | refus partie (g) | refus cumulé (g) | Rc%  | Tc cumulé | TC%  |
|--------------|------------------|------------------|------|-----------|------|
| 12,5         | 0                | 0                | 0    | 1000      | 100  |
| 5            | 62               | 62               | 6.2  | 938       | 93,8 |
| 2            | 248              | 310              | 31   | 690       | 69   |
| 1            | 313              | 623              | 62.3 | 377       | 37,7 |
| 0,5          | 231              | 854              | 85.4 | 146       | 14,6 |
| 0,2          | 127              | 981              | 98.1 | 19        | 1,9  |
| 0,08         | 11               | 992              | 99.2 | 8         | 0,8  |
| fond         | 8                | 1000             | 100  | 0         | 0    |



2-D'après le courbe granulométrique

- $d_{60} = 1,7$
- $d_{10} = 0,38$
- $d_{30} = 0,75$

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

$$C_u = 4,47 \text{ mm}$$

$$C_c = D_{30}^2 / D_{60}D_{10}$$

$$C_c = 0,87 \approx 0,9$$

La nature du sol :

La classification LCPC se fait par deux tamis de références (2mm et 80Mm)

**1ere question** : S'agit-il d'un sol grossier SG ou sol fin SF ?

tamis 80Mm ( $R_c\%=99.2\%$ ,  $T_c\%=0.8\%$ ) implique que  $R_c > T_c$  donc on a un sol grossier  
 tamis 2mm ( $R_c\% = 31\%$ ,  $T_c\% = 69\%$ ) on calcul

$$T_c^* = 69 - 0.8 = 68.2\%$$

**RC = 31% et TC \* = 68.2%** Donc **TC \* > Rc** un sable

**Troisième question** : il faut voir le pourcentage des inférieurs à 80 microns : Tc en %

Tc=0.8 % <5% Sable propre

Il faut chercher Cc et Cu

Coefficient de courbure

$$C_u = 4.47$$

Coefficient d'uniformité

$$C_c = 0.9$$

**Donc  $1 \leq C_c \leq 3$  ne vérifie pas et  $C_u \geq 4$  vérifié** Donc un sol : *sable propre mal graduée*

### EXERCICE N°5 :

$$m = 3200g$$

| Maille (mm) | Refus | RC   | Rc(%)  | Tamisat (%) |
|-------------|-------|------|--------|-------------|
| 200         | 0     | 0    | 0      | 100%        |
| 100         | 64    | 64   | 2%     | 98%         |
| 50          | 416   | 480  | 15%    | 85%         |
| 20          | 352   | 832  | 26%    | 74%         |
| 10          | 192   | 1024 | 32%    | 68%         |
| 5           | 128   | 1152 | 36%    | 64%         |
| 2           | 128   | 1280 | 40%    | 60%         |
| 1           | 276   | 1556 | 48.62% | 52%         |
| 0,5         | 160   | 1716 | 53.62% | 46.38%      |
| 0,2         | 32    | 1748 | 54.62% | 45.375%     |
| 0,08        | 192   | 1940 | 60.62% | 39.37%      |
| fond        | 1260  | 3200 | 100%   | 0           |

a)  $20\text{mm} \leq d \leq 200 \text{ mm}$

$$100 - 74 = 26\% \text{ de cailloux.}$$

$2\text{mm} \leq d \leq 20 \text{ mm}$

$$74 - 60 = 14\% \text{ de grave.}$$

$0,2\text{mm} \leq d \leq 2 \text{ mm}$

$$60 - 30 = 6\% \text{ de sable fin}$$

La classification LCPC :

La classification LCPC se fait par deux tamis de références (2mm et 80Mm)

**1ere question** : S'agit-il d'un sol grossier SG ou sol fin SF ?

tamis 80Mm ( $R_c\%=60.62\%, T_c\%=39.37\%$ ) implique que  $R_c > T_c$  donc on a un sol grossier

tamis 2mm ( $R_c\% = 40\%, T_c\% = 60\%$ ) on calcul

$$T_c * = 60 - 39.37 = 20.63\%$$

**RC = 40% et TC \* = 20.63%** Donc  $R_c > T_c *$  un gravier

**Troisième question** : il faut voir le pourcentage des inférieurs à 80 microns : Tc en %  
 $T_c=39.37\% > 12\%$  cherchons

$$I_p = W_L - W_P$$

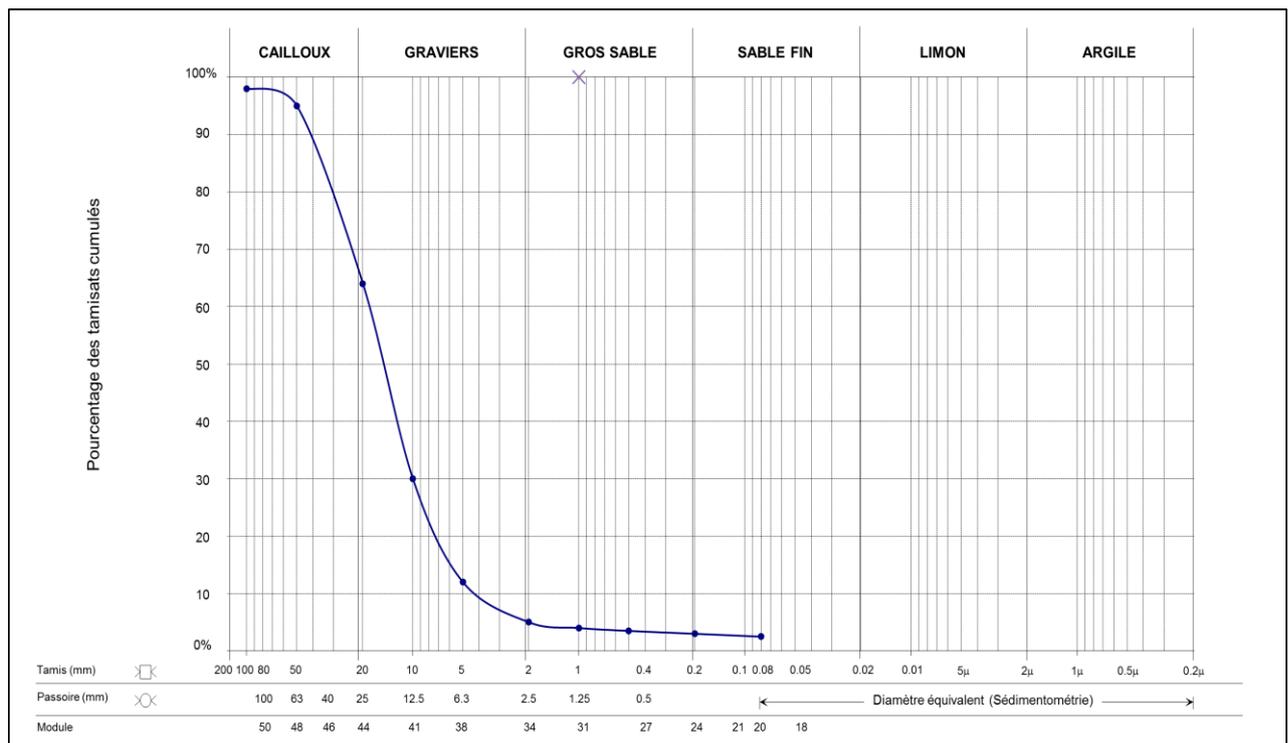
$I_p = 65 - 45 = 20\%$  d'après le diagramme de Casagrande on a gravier limoneux très plastique.

$I_p \text{ théorique} = 0.73 (W_L - 20) = 32.85$  et  $I_p \text{ expérimentale} = 20\%$  donc  $I_{p\text{thé}} > I_{p\text{exp}}$  donc c'est un limon

Enfin notre sol est **gravier limoneux très plastique**

## EXERCICE N°6 :

| Maille | Tamisat (%) | Rc(%) |
|--------|-------------|-------|
| 100    | 98          | 2     |
| 50     | 95          | 5     |
| 20     | 64          | 36    |
| 10     | 30          | 70    |
| 5      | 12          | 88    |
| 2      | 5           | 95    |
| 1      | 4           | 96    |
| 0,5    | 3,5         | 96.5  |
| 0,2    | 3           | 97    |
| 0,08   | 2,5         | 97.5  |
| fond   | 0           | 100   |



Les proportions des différents constituants

$$2 \text{ cm} \leq d \leq 200 \text{ mm}$$

$$100 - 64 = 46\% \text{ de cailloux}$$

$$2 \text{ mm} \leq d \leq 20 \text{ mm}$$

$$64 - 5 = 59\% \text{ de grave.}$$

$$0,2 \text{ mm} \leq d \leq 2 \text{ mm}$$

$$5 - 3 = 2\% \text{ de gros sable}$$

$$0,02 \text{ mm} \leq d \leq 0,2 \text{ mm}$$

$$3 - 0 = 3\% \text{ de sable fin}$$

D'après la courbe granulométrique

- $d_{60} = 21$
- $d_{30} = 13$
- $d_{10} = 7$

$$C_u = 3$$

$$C_c = 1,149$$

La classification LCPC se fait par deux tamis de références (2mm et 80Mm)

**1ere question** : S'agit-il d'un sol grossier SG ou sol fin SF ?

tamis 80Mm ( $R_c\% = 97.5\%$ ,  $T_c\% = 2.5\%$ ) implique que  $R_c > T_c$  donc on a un sol grossier  
tamis 2mm ( $R_c\% = 95\%$ ,  $T_c\% = 5\%$ ) on calcul

$$T_c^* = 5 - 2.5 = 2.5\%$$

**RC = 95% et TC \* = 2.5%** Donc **TC \* < RC** un gravier

**Troisième question** : il faut voir le pourcentage des inférieurs à 80 microns : Tc en %

$T_c = 2.5\% < 5\%$  Sable propre

Il faut chercher Cc et Cu

Coefficient de courbure

$$C_u = 3$$

Coefficient d'uniformité

$$C_c = 1.149$$

**Donc  $1 \leq C_c \leq 3$  vérifie et  $C_u < 4$  ne vérifie pas vérifié** Donc un sol : *gravier propre mal graduée*

### Exercice N°7 :

1. Courbe granulométrique :

Un échantillon de sol de 147,2 est passé à travers une série de tamis avec des ouvertures décroissantes du haut vers le bas.

a. Pesage des refus cumulés ( $\Sigma R_i$ )

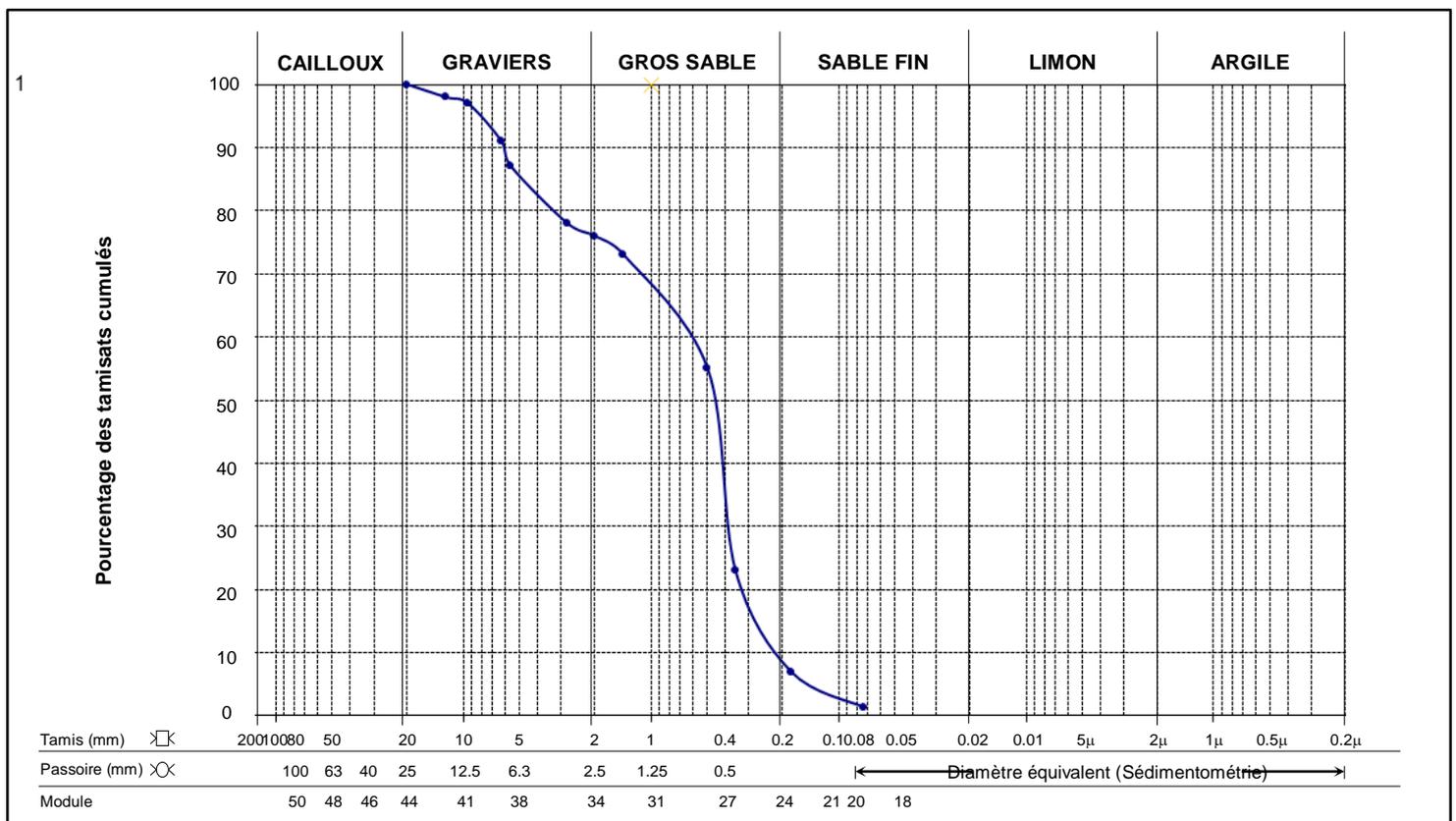
b. Calcul du pourcentage (%) des refus cumulés ( $PR_i$ )  $\Rightarrow PR_i = \frac{\Sigma R_i}{M_s} =$

$$\frac{\text{Masse des refus cumulés}}{\text{Masse totale du sol sec}}$$

| Diamètre tamis (mm) | Refus chaque tamis (g) | Refus cumulé (g) | % des refus cumulés | % des passants cumulés |
|---------------------|------------------------|------------------|---------------------|------------------------|
| 20                  | 0                      | 0                | 0                   | 100                    |
| 12,5                | 1,7                    | 1,7              | 1,15                | 98,85                  |
| 9,5                 | 2,3                    | 4,0              | 2,72                | 97,28                  |
| 6,3                 | 8,4                    | 12,4             | 8,42                | 91,58                  |
| 5,6                 | 5,7                    | 18,1             | 12,30               | 87,70                  |
| 2,8                 | 12,9                   | 31               | 21,06               | 78,94                  |
| 2                   | 3,5                    | 34,5             | 23,44               | 76,56                  |
| 1,4                 | 1,1                    | 35,6             | 24,18               | 75,82                  |
| 0,5                 | 30,5                   | 66,1             | 44,90               | 55,10                  |
| 0,355               | 46,3                   | 112,4            | 76,36               | 23,64                  |
| 0,18                | 25,4                   | 137,8            | 93,61               | 6,39                   |
| 0,074               | 7,4                    | 145,2            | 98,64               | 1,36                   |

c. Calcul du pourcentage des tamisats (passant) cumulés ( $T_i$ ) (%)  $\Rightarrow \frac{M_s}{M_s} = 1 = 100\%$

$$T_i (\%) = 100 - Pr_i = 100 - \% \text{ des refus cumulés}$$



Dimension caractéristiques :

$$D_{60} = 0,70 \text{ mm} ; D_{30} = 0,37 \text{ mm} ; D_{10} = 0,20 \text{ mm}$$

$$2a. \text{ Coefficient d'uniformité } \Rightarrow C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \Rightarrow C_u = \frac{0,70}{0,20} = \boxed{3,5}$$

$$2b. \text{ Coefficient de courbure } \Rightarrow C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60}D_{10}} \Rightarrow C_c = \frac{(0,37)^2}{0,20 \times 0,70} = \boxed{0,90}$$

### 3. Classification du sol

Le sol comporte moins de 50% de particules fines (3%)  $\Rightarrow$  Sol grenu

Plus de 50% de particules grossières ( $>0,08$  mm) ont un diamètre inférieur à 2mm (73,5%) :  $\Rightarrow$  Sable (S)

Le sol comporte moins de 5% de particules fines :  $\Rightarrow$  Sable propre.

Coefficient d'uniformité et de courbure :

$$\left. \begin{array}{l} C_u = 3,5 < 6 \Rightarrow \text{condition non vérifiée} \\ C_c = 0,90 < 1 \Rightarrow \text{condition non vérifiée} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Deux conditions non vérifiées} \\ \Rightarrow \boxed{\text{Mal gradué (m)}}$$

$\boxed{\text{Résultat } \Rightarrow \text{Sable propre mal gradué } \Rightarrow \text{Sm}}$

### EXERCICE N°08:

L'indice de plasticité noté  $I_p$  est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité des sols  $I_p - w_l - w_p$

$$I_p = (0,72 - 0,37) = 0,35 \text{ Non plastique} \quad I_{p2} = (0,72 - 0,35) = 0,37 \text{ Non plastique}$$

$$S_r = \frac{v_w}{v_w + v_\alpha} \text{ sol saturé } S_1 = 1 \quad V_w = V_v (V_t - V_s) \dots \dots (1) \quad V_t = 3 \text{ m}^3$$

$$W_s = 49,5 \text{ kn} \rightarrow V_s = \frac{W_s}{\gamma_s} = 49,5 \text{ kn} / 27 (\text{KN/m}^3) = 1,83 \text{ m}^3$$

$$(1) \rightarrow V_w = 3 - 1,83 = 1,67 \text{ m}^3$$

$$c-e = V_w / V_s = (V_t - V_s) / V_s = 1,67 * 100 / 1,83 \text{ m}^3 = 63,75\%$$

$$W = W_w \frac{100}{W_s} \quad W_w = \gamma_w V_w = 10 \cdot 1,67 = 11,67 \text{ KN}$$

$$W = 11,67 \frac{100}{49,5} = 23,57\%$$

$$Y_{sat} = W/V + (W_s + W_w)/(V) = (11,67 + 49,5)/(3) = 61,173$$

$$Y_{sat} = 20,39 \text{ KN/m}^3$$

Indice de densité pour donner une idée de l'état de compacité dans lequel se trouve

Un sol grenu à l'état naturel on définit l'indice de densité :

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} : \text{indice des vides dans l'état le plus compact}$$

$e_{max}$  : indice des vides dans l'état le moins compact

$e$  : indice des vides in situ

$ID = (0,9 - 0,6375)/(0,9 - 0,4) = 0,525$  donc sol très peu compact car  $ID$  entre 0 et 15

-pour un sol lâche  $e = e_{max}$  donc  $ID = 0$

-Pour un sol serré  $e = e_{min}$  donc  $ID = 1$

### **EXERCICE N°09:**

Classification des sols selon leur teneur en argile  $I_p = W_L - W_p$

| Sol   | $I_p = W_L - W_p$  |
|-------|--|
| Sol 1 | $I_{p1} = W_{L1} - W_{p1} = 46,5 - 21 \Rightarrow I_{p1} = 25,6\%$ |
| Sol 2 | $I_{p2} = W_{L2} - W_{p2} = 63 - 21 \Rightarrow I_{p2} = 42\%$     |
| Sol 3 | $I_{p3} = W_{L3} - W_{p3} = 35 - 18 \Rightarrow I_{p3} = 17\%$     |

Classement: Sol 2  $\Rightarrow$  Sol 1  $\Rightarrow$  Sol 3 indice de consistance

| Sol   | $I_L = \frac{W - W_p}{I_p}$                      |
|-------|--|
| Sol 1 | $I_{L1} = \frac{50 - 21}{25,6} \Rightarrow 1,13$ |
| Sol 2 | $I_{L2} = \frac{35 - 21}{42} \Rightarrow 0,33$   |
| Sol 3 | $I_{L3} = \frac{18 - 18}{17} \Rightarrow 0$      |

|       |   |
|-------|---|
| Sol   | $I_c = \frac{W_L - W}{I_p}$                               |
| Sol 1 | $I_{c1} = \frac{46.5-50}{25.6} \Rightarrow I_{c1} = 0.14$ |
| Sol 2 | $I_{c2} = \frac{63-35}{42} \Rightarrow I_{c2} = 0.667$    |
| Sol 3 | $I_{c3} = \frac{35-18}{17} \Rightarrow I_{c3} = 1$        |

### EXERCICE N°10 :

$I_p$  Argile terme

$$\gamma_h = \frac{\gamma}{\gamma_w} \gamma_h \left( \frac{1+w}{1+e} \right) \cdot \gamma_s$$

$$w = \frac{e \cdot S_r \cdot \gamma_w}{\gamma_s} = \frac{e \cdot S_r}{G_r}$$

$$w = \frac{e}{G_r} \Rightarrow e = G_r \cdot w$$

$$e = 0.38 \times 2.71 \Rightarrow e = 1.02$$

$$\gamma_h = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{\left( \frac{1+w}{1+e} \right) \cdot \gamma_s}{\gamma_w} = \left( \frac{1+w}{1+e} \right) \cdot G_s$$

$$\gamma_h = \left( \frac{1+0.38}{1+1.02} \right) \cdot 2071$$

$$\gamma_h = 1.85 \Rightarrow \text{Sol X}$$

$$\text{Sol Y : } \gamma_h = \frac{\gamma}{\gamma_w}, w = \frac{e \cdot S_r \cdot \gamma_w}{\gamma_s} = \frac{e \cdot S_r}{G_s}$$

Le sol qui contient beaucoup d'argile c'est la sol qui a  $I_p$  élevé.

$$\begin{aligned} \text{Sol X} \Rightarrow I_p &= W_L - W_p \\ &= 0.62 - 0.26 \\ &= 0.36 \end{aligned}$$

$$\text{Sol Y} \Rightarrow I_p = W_L - W_p$$

$$= 0.34 - 0.19$$

$$= 0.15$$

Le sol X contient beaucoup d'argile

$$W = S_r \cdot \left( \frac{S_w}{\gamma_s} \right) e$$

$$e = \frac{W \cdot G}{S_r} \Rightarrow e =$$

|  |  |
|--|--|
| <p><u>Sol 1 X</u></p> $e = \frac{0.38 \times 2.71}{1}$ $e = 1.0298$  | <p><u>Sol 2 Y</u></p> $e = 0.25 \times 2.67$ $e = 0.6675$  |
| $\frac{\gamma_h}{\gamma_w} = (1 - n)G_s + n$ $n_1 = \frac{e}{1 + e} = 0.51$ $\frac{\gamma_h}{\gamma_w} = (1 - 0.51)2.71 + 0.51$ $\frac{\gamma_h}{\gamma_w} = 1.8379$ | $\frac{\gamma_h}{\gamma_w} = (1 - n)G_s + n$ $n_2 = \frac{e}{1 + e} = 0.40$ $\frac{\gamma_h}{\gamma_w} = (1 - 0.40)2.67 + 0.4$ $\frac{\gamma_h}{\gamma_w} = 2.002$ |

### EXERCICE N°11 :

$$m = 70g$$

- Limite de liquidité :  $w_L = w \left( \frac{N}{25} \right)^{0.121}$
- Limite de plasticité :  $w_P = \frac{\sum w}{n^{bre_w}}$
- Indice de plasticité :  $I_P = w_L - w_P$
- Indice de liquidité :  $I_L = \frac{w - w_P}{I_P}$
- L'indice de consistance :  $I_C = \frac{w_L - w}{I_P}$
- $w = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{m_{sec}} et w = \frac{M_h - M_s}{M_s - M_{tar}}$

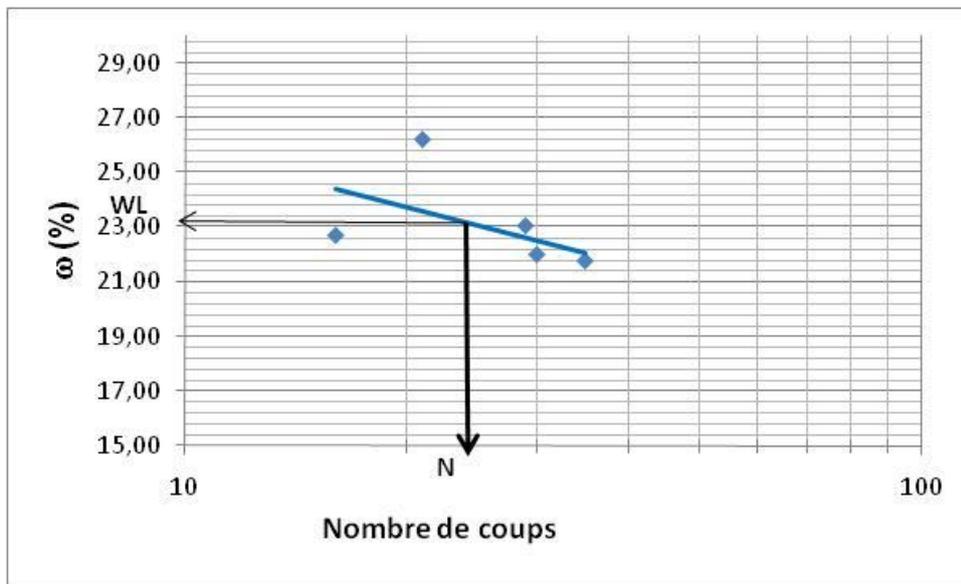
| Nbre de coups | Teneur en eau % | w <sub>L</sub> % |
|---------------|-----------------|------------------|
| 16            | 23,98           | 22,72%           |
| 21            | 26,75           | 26,19            |
| 29            | 22,62           | 23,03            |
| 30            | 21,51           | 21,98            |
| 35            | 20,89           | 21,75            |

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

Graphiquement : w<sub>L</sub>

On rend le nuage de point du graphe sous forme de ligne de droite pour tirer w<sub>L</sub> a 25 coups

On trouve w<sub>L</sub>=23%



a) On a  $w = \frac{M_h - M_s}{M_s - M_{tar}}$

$$w_p = \frac{\sum w}{nw}$$

| Essais | W%    | W <sub>p</sub> |
|--------|-------|----------------|
| 1      | 12    | 12,67          |
| 2      | 12,22 |                |
| 3      | 13,79 |                |

b)  $I_p = w_L - w_p$

$$w_{Lng} = \frac{\sum w}{nw}$$

$$w_{Lmoy} = \frac{29,72 + 26,19 + 23,03 + 21,98 + 21,73}{5}$$

$$w_L = 23,13 \%$$

$$I_p = 23,13 - 12,67$$

$$I_p = 10,46$$

D'après le diagramme de Casagrande la ligne A le sol est un argile peu plastique.

$$w_{naturel} = 14\%$$

$$I_c = \frac{w_L - w}{I_p} = \frac{23,13 - 14}{10,46}$$

$$I_c = 87,286$$

On conclut que le sol est un peu plastique proche de l'état solide

### **EXERCICE N°12:**

Calcul :

$$I_p = w_L - w_p ;$$

①

|                |     |    |    |     |    |
|----------------|-----|----|----|-----|----|
| Z (m)          | 1,5 | 2  | 4  | 5,5 | 6  |
| w <sub>p</sub> | 35  | 33 | 29 | 20  | 16 |
| w <sub>l</sub> | 52  | 48 | 42 | 36  | 28 |
| w              | 49  | 47 | 45 | 43  | 41 |
| I <sub>p</sub> | 17  | 15 | 13 | 16  | 12 |

$$\textcircled{2} \quad e = \frac{w \gamma_s}{s_r \cdot \gamma_w} \text{ et } \begin{cases} \gamma_s = 26 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \\ s_r = 1 \end{cases}$$

|       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Z (m) | 1,5   | 2     | 4     | 5,5   | 6     |
| w (%) | 49    | 47    | 45    | 43    | 41    |
| e     | 1,274 | 1,222 | 1,170 | 1,118 | 1,066 |

# Solutions Partie 3 :

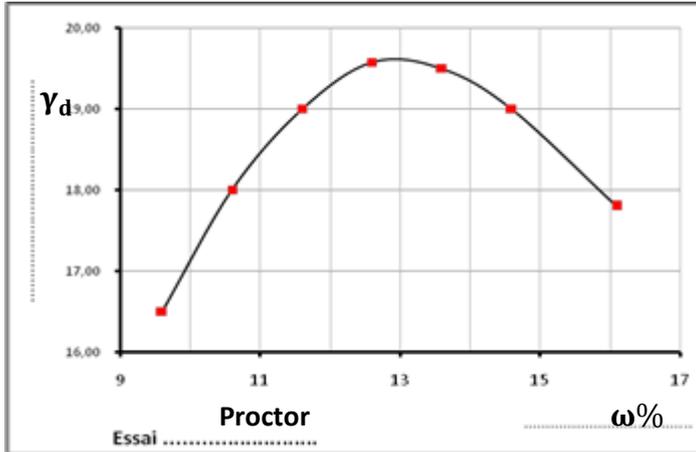
## Compactage des sols

---

## Solution Partie 03 : Compactage des sols

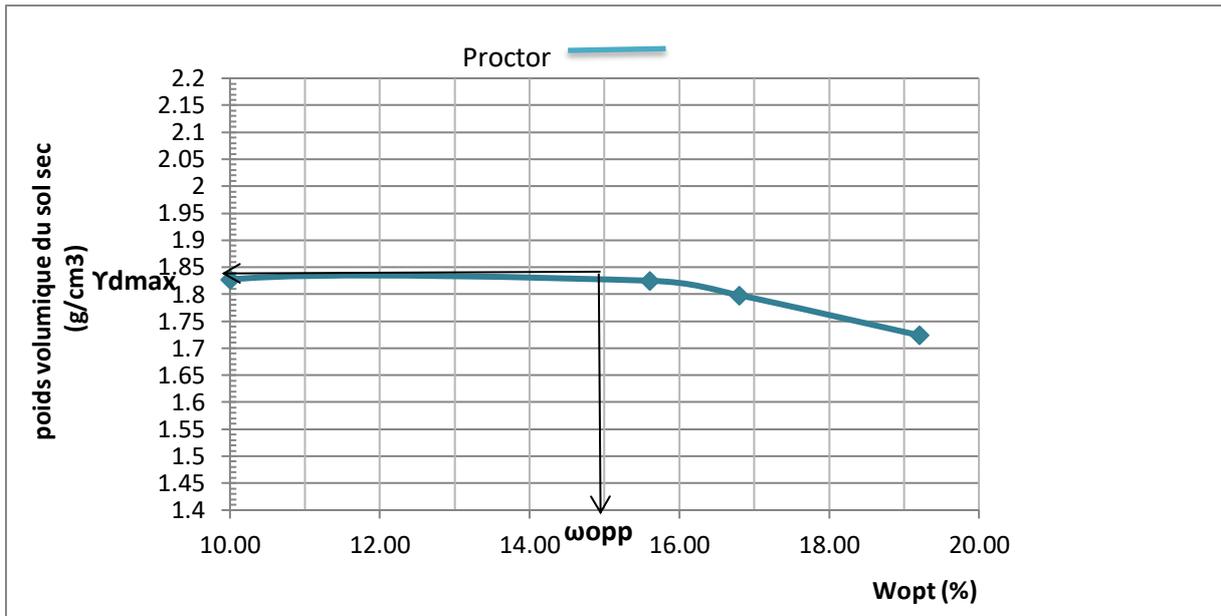
### EXERCICE N°1 :

Pour  $\gamma_d = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$   $\omega = 10.70\%$



### EXERCICE N°2:

| Masse g | W%   | $\gamma = m/v$ | $\gamma_d = \gamma / (1 + w)$ | $\gamma_d / \gamma_w$ |
|---------|------|----------------|-------------------------------|-----------------------|
| 2010    | 12.8 | 2.01           | 1.782                         | 1.728                 |
| 2092    | 14.5 | 2.09           | 1.827                         | 1.827                 |
| 2114    | 15.6 | 2.11           | 1.825                         | 1.825                 |
| 2100    | 16.8 | 2.10           | 1.798                         | 1.798                 |
| 2055    | 19.2 | 2.05           | 1.724                         | 1.724                 |



D'après la courbe de Proctor :

$$(\omega_{opp}=14.95\%, \gamma_{dmax}=1.827 \text{ g/cm}^3)$$

le degré de saturation a l'optimum :

$$S_r = w\gamma_s / e\gamma_w = 0.90$$

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_{dmax}} - 1$$

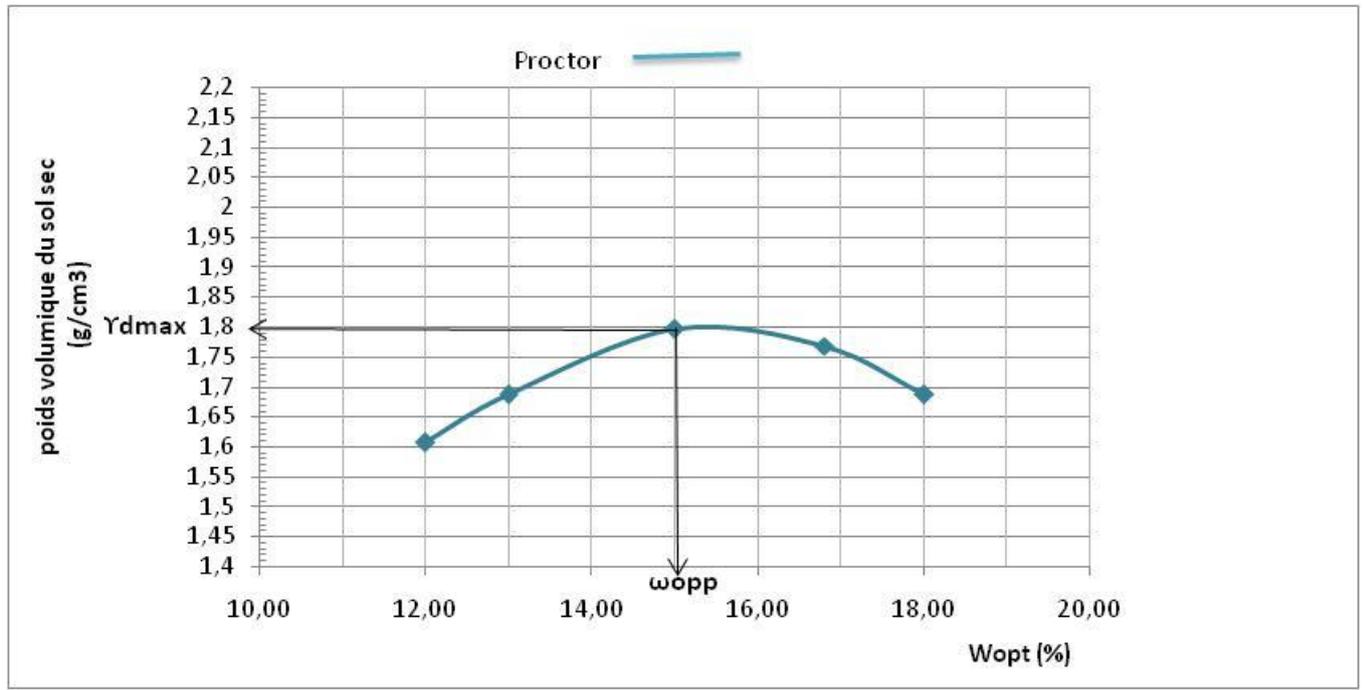
### EXERCICE N03 :

Cherchons :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{(1 + w)}$$

|            |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\gamma_d$ | 16,07 | 16,87 | 17,96 | 17,68 | 16,87 | 15,88 |
| $\gamma$   | 18,00 | 19,06 | 20,65 | 20,65 | 19,91 | 19,06 |

Tracer la courbe de Proctor



D'après la courbe de Proctor

( $\omega_{opp}=15\%$ ,  $Y_{dmax}=1.796 \text{ g/cm}^3$ )

**EXERCICE 04:**

Sol à compacter dans un moule  $V= 1000 \text{ cm}^3$

a/ Tracer la courbe Proctor

La courbe Proctor correspond à

Détermination de pour les six niveaux d'eau :

$y_d = f(\omega)$

Soit  $W_t = M_{t,g}$

Le poids volumique est :

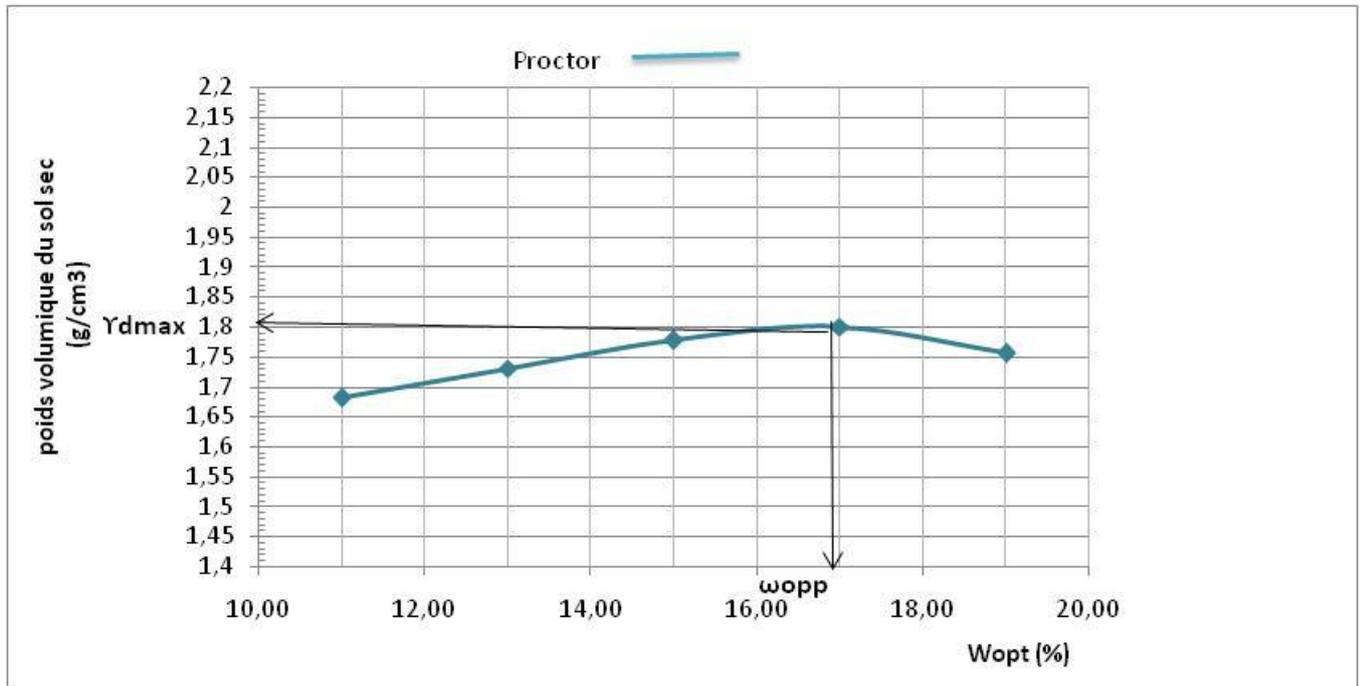
$$Y_d = \frac{W_s}{V}$$

La teneur est donner par :

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} = \frac{W_t - W_s}{W_s} = \frac{W_t}{W_s} - 1$$

$$W_s = \frac{W_t}{1 + \omega}$$

| Teneur en eau %      | 11      | 13      | 15      | 17      | 19      | 21      |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Masse humide (g)     | 1867    | 1956    | 2044    | 2106    | 2090    | 2036    |
| Poids sec $W_s$ (KN) | 0.01682 | 0.01731 | 0.01777 | 0.01800 | 0.01756 | 0.01683 |
| $Y_d \text{ KN/M}^3$ | 16.82   | 17.31   | 17.77   | 18.00   | 17.56   | 16.83   |



Le poids volumique maximal du sol sec :

$$Y_{dopt} = 18.05 \text{ KN/m}^3$$

La teneur en eau optimale

$$\omega_{opt} = 16.7\%$$

3 Dans quel domaine de teneur en eau doit-on compacter pour que  $\gamma_d > 0.95 \gamma_d(\text{optimum})$ .

Pour  $\gamma_d > 0.95 \gamma_d(\text{optimum})$  . alors  $\gamma_d > 17015 \text{ KN/m}^3$ . Le compactage doit se faire entre 12 % et 16.7 % , sur la partie sec de la courbe Proctor (coté gauche) pour avoir le poids volumique sec supérieur à 16.70 kN/m<sup>3</sup> et une diminution de l'indice des vides (compactage).

4 -Calcul du volume d'eau à ajouter à se sol pour compacter les 25000 m<sup>3</sup> ,

Sol utilisé comme remblai de :

$$\omega_t = 85\% \quad y_s = 27 \text{ KN/m}^3$$

Le sol est compacté à l'optimum Proctor

$$\omega_{opt} = 16.7\% \quad Y_{dopt} = 18.05 \text{ KN/m}^3$$

Détermination du poids des grains solides :

$$Y_{dopt} = \frac{W_s}{V} w_s = V_{ydopt} = 25000 \times 18.05 = 451250 \text{ KN}$$

- Le volume d'eau contenue dans les 25000 m<sup>3</sup> de sol compacter

$$\omega_{opt} = \frac{W_{wopt}}{W_s} W_{wopt} = \omega_{opt} W_s$$

- Le volume d'eau contenue dans les camions lors du transport du poids des grains solides :

$$\omega_t = \frac{W_{wt}}{W_s} W_{wt} = \omega_t W_s$$

- Calcul du poids de l'eau à ajouter :

$$W_{wopt} - W_{wt} = \omega_{opt} W_s - \omega_t \cdot W_s = (\omega_{opt} - \omega_t) W_s$$

$$M_{ajouté} = W_{wopt} - W_{wt} = \omega_{opt} W_s - \omega_t \cdot W_s = (\omega_{opt} - \omega_t) W_s$$

$$M_{ajouté} = (0.167 - 0.085) 451250 = 37002.5 \text{ KN}$$

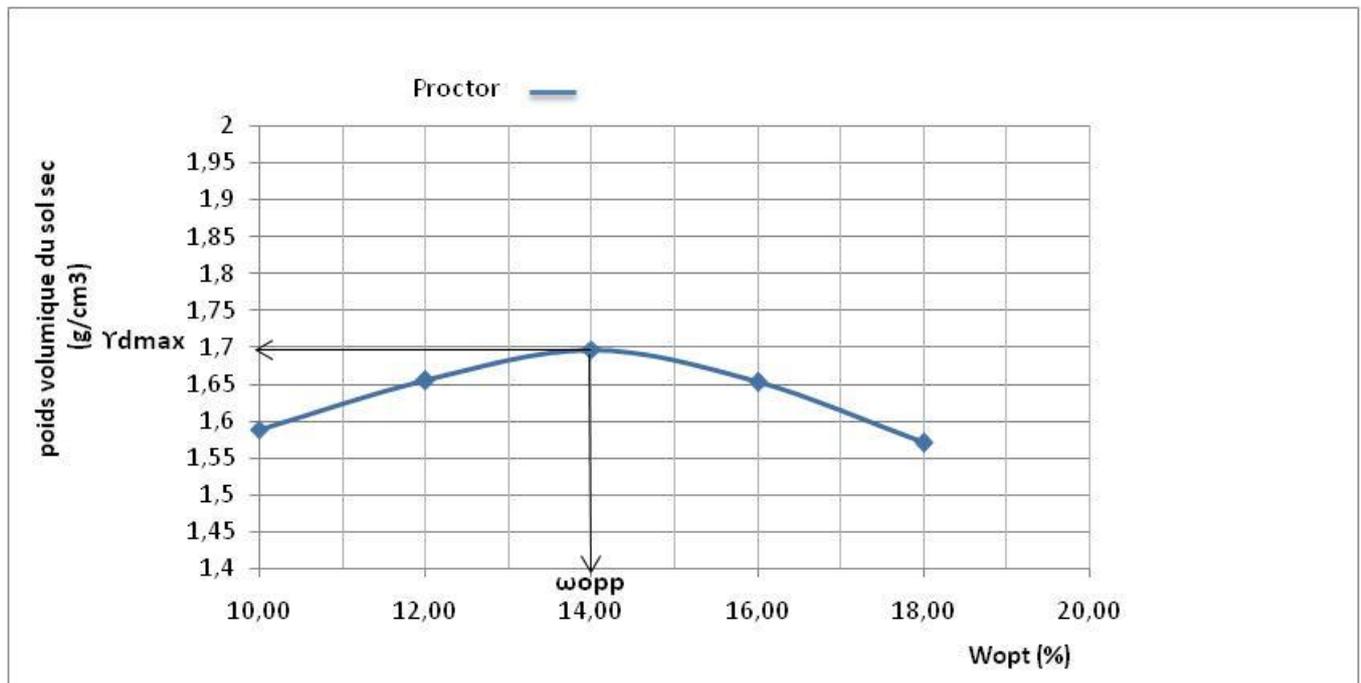
- Le volume d'eau à ajouter est :

$$Y_w = \frac{W_s}{V_w} V_w = \frac{W_w}{Y_w} = \frac{37002.5}{10} = 3700.25 \text{ m}^3$$

## **EXERCICE N05:**

### **1. Courbe de compactage Proctor et caractéristiques de l'optimum**

| Volume du moule (mm <sup>3</sup> )                  | 943895 | 943895 | 943895 | 943895 | 943895 | 943895 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Masse humide du sol dans le moule (kg)              | 1.65   | 1.75   | 1.82   | 1.81   | 1.75   | 1.69   |
| Teneur en eau (%)                                   | 10     | 12     | 14     | 16     | 18     | 20     |
| Poids volumique humide (kN/m <sup>3</sup> )         | 17,48  | 18,54  | 19,28  | 19,18  | 18,54  | 17,90  |
| Poids volumique sec $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 15,89  | 16,55  | 16,97  | 16,53  | 15,71  | 14,92  |



On déduit les caractéristiques de l'optimum :

$$\gamma_{dmax} = 16,97 \text{ kN/m}^3$$

$$W_{opt} = 14\%$$

2. Degré de saturation correspondant à l'optimum Proctor

$$\left. \begin{aligned} S_r &= \frac{W_{\text{opt}} \gamma_s}{e \gamma_w} \\ e &= \frac{\gamma_s}{\gamma_{\text{dmax}}} - 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow S_r = \frac{W_{\text{opt}} \gamma_s}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{\text{dmax}}} - 1\right) \gamma_w}$$

A l'optimum Proctor :

$$\gamma_{\text{dmax}} = 16,97 \text{ kN/m}^3 \quad \gamma_s = 26,50 \text{ kN/m}^3$$

$$W_{\text{opt}} = 14\% \quad \gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$$

$$\Rightarrow S_r = \frac{0,14}{\left(\frac{26,50}{16,97} - 1\right)} \frac{26,50}{10} = 66,06\% \Rightarrow \text{A l'optimum Proctor } \boxed{S_r = 66,06\%}$$

- 3) Le pourcentage (A) du volume d'air contenu dans l'échantillon  $\Rightarrow A(\%) = \frac{\text{Volumed'air}}{\text{Volumetotal}} = \frac{V_a}{V}$

Le volume de l'air contenu dans l'échantillon ( $V_a$ ) :  $\Rightarrow V_a = V - V_s - V_w$

$$\Rightarrow A(\%) = \frac{V_a}{V} = \frac{V - V_s - V_w}{V} = 1 - \frac{V_s}{V} - \frac{V_w}{V}$$

La porosité est définie (n) :  $n = \frac{V_v}{V}$

La porosité est définie ( $S_r$ ) :  $S_r = \frac{V_w}{V_v} \Rightarrow \boxed{V_w = S_r V_v}$

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_s}{V} &= \frac{V - V_v}{V} = 1 - \frac{V_v}{V} = 1 - n \\ \frac{V_w}{V} &= \frac{S_r V_v}{V} = n S_r \end{aligned} \right\} \Rightarrow \boxed{A(\%) = n(1 - S_r)}$$

- 4) Quantité d'eau à ajouter pour l'amener, à volume constant, à la saturation  $w = 16\%$

$$V = \text{Cte} = 950 \text{ cm}^3$$

A la teneur de 16%, d'après le tableau ci-dessus on a :

$$\gamma_h = 19,18 \text{ kN/m}^3 \quad \gamma_d = 16,53 \text{ kN/m}^3 \quad \Leftrightarrow W(\%) = \frac{M_w}{M_s} = 16\%$$

A la saturation, la teneur en eau de saturation est:

$$W_{\text{sat}}(\%) = \frac{M_w + \Delta M_w}{M_s} \text{ avec } W_{\text{sat}} = e_f \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$$

La saturation est atteinte à volume constant ce qui implique que l'indice des vides initial ( $e_i$ ) est égale à l'indice des vides final ( $e_f$ ) à la saturation :  $\Rightarrow e_f = e_i = e$

Connaissant la masse volumique du sol sec ( $\gamma_d$ ) et la masse volumique des grains solides ( $\rho_s$ ), il existe une relation entre ( $e$ ), ( $\gamma_d$ ) et ( $\gamma_s$ ) :  $\Rightarrow e = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d}$

A la teneur de 16%, l'indice des vides initial  $e_i$  est :  $\Rightarrow e_i = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d}$

❖ Application numérique :

$$\gamma_d = 16,53 \text{ kN/m}^3 ; \quad \gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3 ; \quad \gamma_s = 26,50 \text{ kN/m}^3$$

$$\Rightarrow e_i = \frac{26,50 - 16,53}{16,53} = 0,60$$

A la saturation, l'indice des vides final  $e_f = e_i = e = 0,60$ , d'où :

$$W_{\text{sat}} = e \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \Rightarrow W_{\text{sat}} = 0,60 \frac{10}{26,50} = 22,64\%$$

$$\text{On a donc : } W(\%) = \frac{M_w}{M_s} = 16\%$$

$$M_s = \rho_d V \quad W_{\text{sat}}(\%) = \frac{M_w + \Delta M_w}{M_s} = 22,64\%$$

En faisant la différence entre la teneur en eau de saturation ( $W_{\text{sat}}$ ) et la teneur en eau naturelle ( $w$ ) on obtient :

$$\Rightarrow W_{\text{sat}} - W = \frac{M_w + \Delta M_w}{M_s} - \frac{M_w}{M_s} = \frac{\Delta M_w}{M_s} + \frac{\Delta M_w}{M_s} - \frac{\Delta M_w}{M_s} = \frac{\Delta M_w}{M_s}$$

$$\Rightarrow \Delta M_w = (W_{\text{opt}} - W) M_s \quad \Rightarrow \Delta M_w = (W_{\text{opt}} - W) \rho_d V$$

❖ Application numérique :

$$W_{\text{sat}} = 22,64\% ; \quad w = 16\% ; \quad \rho_d = 1653 \text{ kg/m}^3 ; \quad V = 950 \text{ cm}^3 = 0,950 \text{ m}^3$$

La masse d'eau  $\Delta M_w$  à ajouter pour saturer le sol à volume constant est:

$$\Rightarrow \Delta M_w = (0,2264 - 0,15) 1653 \times 0,950 = 104,3 \text{ kg}$$

L'échantillon a une teneur en eau dépassant la teneur en eau de compactage, on a donc pas besoin de rajouter de l'eau pour compacter le sol.

$$W_{\text{opt}} = 14\% \quad W = 16\%$$

$$\Rightarrow W > W_{\text{opt}}$$

## EXERCICE N06:

1) Construction de la courbe de compactage Proctor  $\gamma_d = f(w)$

|  |      |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|------|
| Masse tare vide (g)                                | 14   | 14   | 14   | 14   | 14   |
| Masse tare + échantillon humide (g)                | 88   | 90,5 | 98   | 94   | 93   |
| Masse tare + échantillon sec (g)                   | 81   | 82   | 87   | 82   | 80   |
| Masse volumique humide du sol (kg/m <sup>3</sup> ) | 1730 | 1950 | 2020 | 1930 | 1860 |

Détermination de la masse de l'échantillon humide ( $M_h$ ) et sec ( $M_s$ )

$$M_h = (\text{Masse tare} + \text{échantillon humide}) - (\text{masse tare vide})$$

$$M_s = (\text{Masse tare} + \text{échantillon sec}) - (\text{masse tare vide})$$

Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

|   |    |      |    |    |    |
|---|----|------|----|----|----|
| Masse de l'échantillon humide $M_h$ (g) | 74 | 76,5 | 84 | 80 | 79 |
| Masse de l'échantillon sec $M_s$ (g)    | 67 | 68   | 73 | 68 | 66 |

Détermination de la teneur en eau ( $w$ )

$$W = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \Rightarrow$$

|      |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| W(%) | 10,45 | 12,50 | 15,01 | 17,65 | 19,70 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|

Détermination du poids volumique de l'échantillon sec ( $\gamma_d$ )

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{(1+w)} = \frac{\rho_h g}{(1+w)} \Rightarrow$$

|                                 |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 15,66 | 17,00 | 17,56 | 16,40 | 15,54 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|

Courbe de compactage Proctor

|  |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teneur en eau W (%)  | 10,45 | 12,50 | 15,00 | 17,65 | 19,70 |
| Poids volumique du sol sec $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 15,66 | 17,33 | 17,56 | 16,40 | 15,54 |

2) Caractéristiques de l'optimum Proctor

$$\gamma_{d\max} = 17,46 \text{ kN/m}^3$$

$$W_{opt} = 14\%$$

3) Degré de saturation correspondant à l'optimum Proctor

$$\left. \begin{aligned} S_r &= \frac{W_{opt} \gamma_s}{e \gamma_w} \\ e &= \frac{\gamma_s}{\gamma_{dmax}} - 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow S_r = \frac{W_{opt} \gamma_s}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{dmax}} - 1\right) \gamma_w}$$

A l'optimum Proctor :

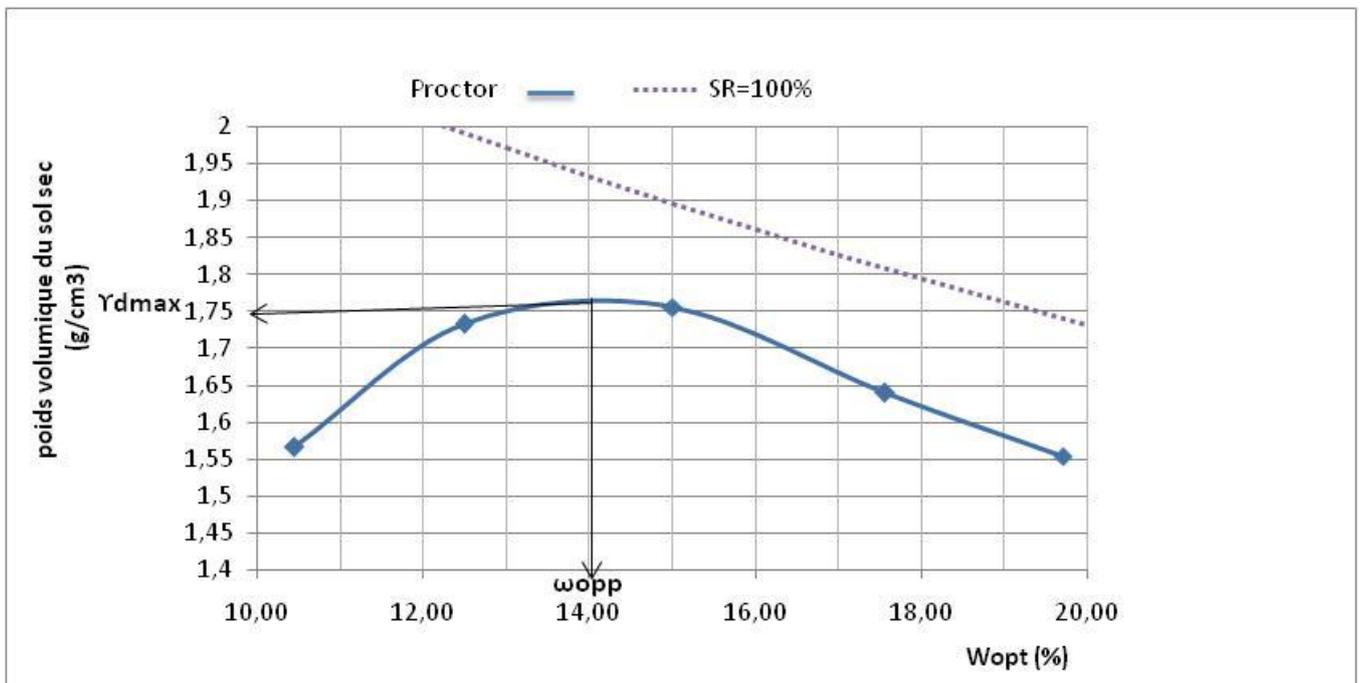
$$\gamma_{dmax} = 17,46 \text{ kN/m}^3 \quad \gamma_s = 26,50 \text{ kN/m}^3$$

$$W_{opt} = 14\% \quad \gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$$

$$\Rightarrow S_r = \frac{0,14}{\left(\frac{26,50}{17,40} - 1\right)} \frac{26,50}{10} = 73,90\% \Rightarrow \text{A l'optimum } \boxed{S_r = 73,90\%}$$

4) Courbe de saturation  $S_r = 100\%$

$$\left. \begin{aligned} \gamma_d &= \frac{\gamma_s}{\left(\frac{W \gamma_s}{S_r \gamma_w} + 1\right)} \\ \gamma_s &= 26,5 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_w &= 10 \text{ kN/m}^3 \end{aligned} \right\} \text{ Courbe de saturation } S_r = 100\% = 1 \Rightarrow \gamma_d = \frac{26,5}{(2,65w+1)}$$



## **EXERCICE 07:**

1. Courbe de compactage
    - Mesure de la masse volumique humide.
- Masse du moule  $m = 4353 \text{ g}$

|   |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teneur en eau estimée (%)   | 9     | 10,50 | 12    | 13,50 | 15    |
| Masse du moule + Masse du sol humide $M_h$ (g)                              | 6289  | 6336  | 6366  | 6390  | 6384  |
| Masse du sol humide $M_h = (m + M_h) - m$ (g)                               | 1936  | 1983  | 2013  | 2037  | 2031  |
| Masse volumique du sol humide $\rho_h = \frac{M_h}{V}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,055 | 2,105 | 2,137 | 2,162 | 2,156 |

Volume du moule  $V = 942 \text{ cm}^3$

$$\text{Calcul de la teneur en eau réelle} \Rightarrow W(\%) = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

| Récipient  |                                   | B7     | A8     | B14    | B8     | B2     |
|--|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Masse du récipient (g)                                   | $M_R$                             | 206,4  | 194,0  | 211,5  | 206,9  | 210,2  |
| Masse du (récipient + sol humide) (g)                    | $M_R + M_h$                       | 1228,8 | 1118,3 | 1342,4 | 1201,4 | 1211,2 |
| Masse (récipient + sol sec) (g)                          | $M_R + M_s$                       | 1142,7 | 1029,7 | 1029,8 | 1090,9 | 1088,3 |
| Masse humide $M_m$ (g)                                   | $(M_R + M_h) - M_R$               | 1022,4 | 924,3  | 1130,9 | 994,5  | 1001,0 |
| Masse sèche $M_s$ (g)                                    | $(M_R + M_s) - M_R$               | 936,3  | 835,7  | 1014,3 | 884    | 878,1  |
| Teneur en eau réelle (%)                                 | $W = \frac{M_h - M_s}{M_s}$       | 9,20   | 10,60  | 11,50  | 12,50  | 14,00  |
| Masse volumique du sol sec $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d = \frac{\rho_h}{1 + W}$ | 1,882  | 1,903  | 1,916  | 1,922  | 1,891  |

1. Courbe de compactage Proctor et caractéristiques de l'optimum

|  |                                   |       |       |       |       |       |
|--|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teneur en eau réelle (%)                                   | $W = \frac{M_h - M_s}{M_s}$       | 9,20  | 10,60 | 11,50 | 12,50 | 14,00 |
| Masse volumique du sol sec $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d = \frac{\rho_h}{1 + W}$ | 1,882 | 1,903 | 1,916 | 1,922 | 1,891 |

On déduit les caractéristiques de l'optimum :  $\gamma_{dmax} = 1,922 \text{ g/cm}^3; W_{opt} = 12,50 \%$

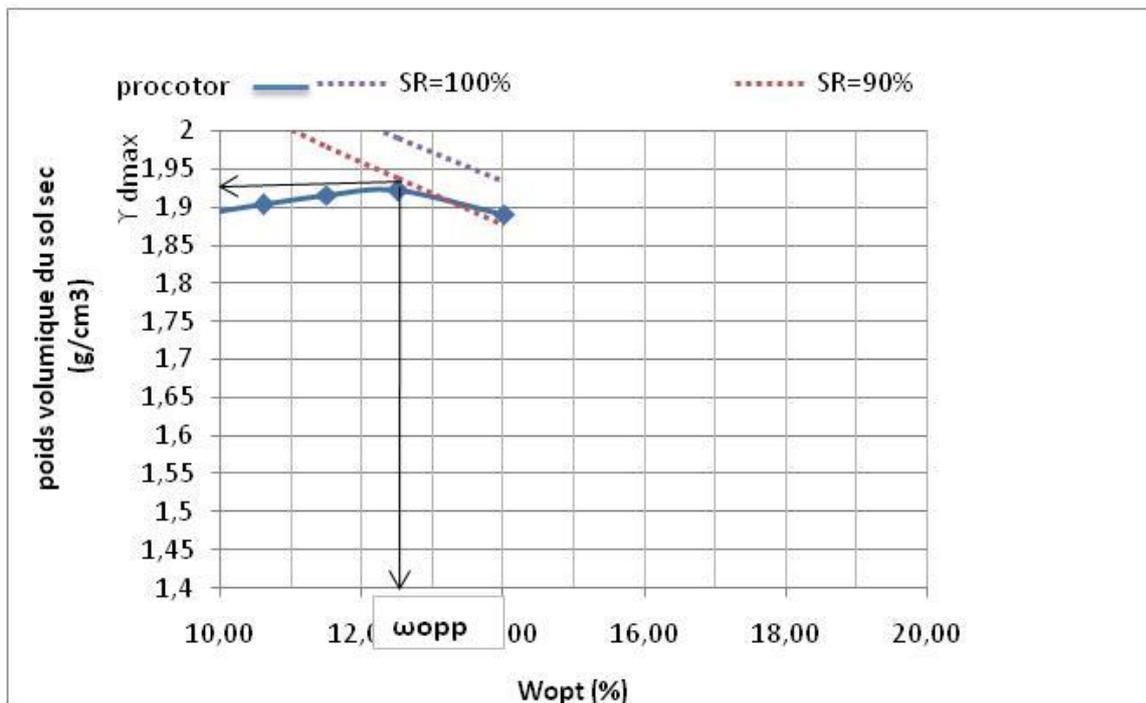
2. Courbes pour  $S_r$  égale à 100% et 90%

$$\left. \begin{aligned} \gamma_d &= \frac{\rho_s}{\left(\frac{W \rho_s}{S_r \rho_w} + 1\right)} \\ \frac{\gamma_s}{\gamma_w} &= 2,70 \end{aligned} \right\}$$

$$\Rightarrow \text{Courbe de saturation } S_r = 100\% = 1 \Rightarrow \gamma_d = \frac{2,7}{(2,7w+1)}$$

$$\Rightarrow \text{Courbe pour } S_r = 90\% = 1 \Rightarrow \gamma_d = \frac{2,7}{(3w+1)}$$

| W (%)  | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   |
|--|------|------|------|------|------|------|
| $\gamma_d$ pour $S_r=100\%$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,17 | 2,13 | 2,08 | 2,04 | 2,00 | 1,96 |
| $\gamma_d$ pour $S_r=90\%$ (g/cm <sup>3</sup> )  | 2,13 | 2,08 | 2,03 | 1,98 | 1,94 | 1,90 |



3. Degré de saturation correspondant à l'optimum Proctor

$$\left. \begin{aligned} S_r &= \frac{W_{opt} \rho_s}{e \rho_w} \\ e &= \frac{\rho_s}{\rho_{dmax}} - 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow S_r = \frac{W_{opt} \rho_s}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_{dmax}} - 1\right) \rho_w}$$

❖ Application numérique  
A l'optimum Proctor:

$$\rho_{dmax} = 1,922 \text{ g/cm}^3 ; \rho_s = 2,70 \text{ g/cm}^3 ; W_{opt} = 12,50\% ; \rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\Rightarrow S_r = \frac{0,125}{\left(\frac{2,70}{1,922} - 1\right)} \frac{2,70}{1} = 83,33\% \Rightarrow \boxed{\text{A l'optimum Proctor } S_r = 83,33\%}$$

4. Volume de l'air à la saturation:

A la saturation, tous les vides sont occupés par l'eau.

Le volume de l'air est donc nul.  $\boxed{V_a = 0}$ .

## Références bibliographiques

- BERRICHE Y.** Aide - mémoire de mécanique des sols, 2004.  
Du matériau discontinu granulaire au milieu continu fictif.
- BOUDIA .M** Fiches TD ,2017-2023
- BRAJA M. D.** Advanced soil mechanics, CRC Press Taylor & Francis Group, 2014.
- COSTET J. et** Cours pratique de mécanique des sols, Tome 2. DUNOD
- SANGLERAT G.** éditeur,1969.
- COSTET J. et** Cours pratique de mécanique des sols, DUNOD éditeur, 1983.
- SANGLERAT G.**
- DEGOUTTE G.** Aide-mémoire de mécanique des sols, 2009.  
Cours et Exercices Hydraulique souterraine
- HALLOUCHE .B**
- HEAD.** Manuel of Soil Laboratory Testing - Vol. 1, 2 et 3 ; Second Edition ; Pentech Press, 1992.
- HOLTZ R D.,** Introduction à la géotechnique, 1991.
- KOVACS W D.**
- PELTIER R.** Manuel du Laboratoire Routier - LCPC - Dunod éditeur, 1969.
- SANGLERAT G.** Problèmes pratiques de mécanique des sols et de fondations, 1980.
- BENBAKHRI A** Polycopie de cours mécanique des sols 1 hydraulique 2023
- SCHLOSSER F.,** Eléments de mécanique des sols - Presses de L'ENPC, 1989.