

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE A SEC

**1. But :** Déterminer les proportions des particules solides de différentes tailles qui constituent le sol.

**2. Principe :** Le principe de cette manipulation consiste à prendre un échantillon de sol séché au préalable et de le verser dans une colonne de tamis dont les tamis sont classés dans l'ordre croissant des ouvertures de bas en haut. La pesée des refus des tamis permet de tracer la courbe granulométrique.

### 3. Mode opératoire

1. Commencer par dresser la colonne des tamis. Les ouvertures des tamis doivent être croissantes de bas en haut. Les tamis à prendre en compte sont en mm :

$$5 - 3.15 - 2 - 1.25 - 0.5 - 0.25 - 0.125 - 0.08$$

2. Prendre 1 kg de sol.

3. Verser le sol sur le tamis supérieur.

4. Procéder à l'agitation mécanique pendant environ 5 min.

5. Procéder à la pesée cumulée des refus des tamis en commençant par le tamis supérieur.



### 4. Calcul

Pour le calcul des pourcentages et le tracé de la courbe granulométrique, le procédé est le suivant:

M est la masse totale de l'échantillon.

| N°<br>Tamis | Ouverture<br>des tamis<br>(mm) | Refus<br>partiel<br>(g) | Refus<br>cumulé<br>(g) | Refus cumulé<br>(%)                          | Tamisa<br>cumulé<br>(%) |
|-------------|--------------------------------|-------------------------|------------------------|--|-------------------------|
| 1           | ....                           | $m_1$                   | $m_1$                  | $R_1 = 100 \times \frac{m_1}{M}$             | $T_1 = 100 - R_1$       |
| 2           | ....                           | $m_2$                   | $m_1 + m_2$            | $R_2 = 100 \times \frac{m_1 + m_2}{M}$       | $T_2 = 100 - R_2$       |
| 3           | ....                           | $m_3$                   | $m_1 + m_2 + m_3$      | $R_3 = 100 \times \frac{m_1 + m_2 + m_3}{M}$ | $T_3 = 100 - R_3$       |

**5. Compte rendu :** Il vous est demandé de :

1. Compléter le tableau des calculs.
2. Tracer la courbe granulométrique.
3. Déterminer les différents diamètres ( $D_{10}$ ,  $D_{30}$  et  $D_{60}$ ) et les deux coefficients  $C_u$  (coefficient d'uniformité) et  $C_c$  (coefficient de courbure), en sachant que :

( $D_{10}$ ,  $D_{30}$  et  $D_{60}$ ) : étant respectivement les diamètres correspondant à 10%, 30% et 60% d'éléments de dimension inférieure.

Le coefficient d'uniformité ou de Hazen :  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

Le coefficient de courbure :  $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$

4. Nommer ce sol selon la classification LCPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées, France)

5. Commenter vos résultats

| $d_{50}$  | Fraction<br>> 80 $\mu\text{m}$   | Fraction<br>< 80 $\mu\text{m}$    |  | Nom LCPC                                    | Nom<br>USCS  |
|---|--|-----------------------------------|--|---|--|
| <b>&gt; 80 <math>\mu\text{m}</math><br/>SOLS GRENUS</b> | <b>Majorité &gt; 2 mm<br/>GRAVES</b>   | 0 à 5%<br><b>Grave<br/>Propre</b> | Cu > 4 et<br>1 < Cc < 3                                      | <b>Gb<br/>Grave Propre bien<br/>graduée</b> | <b>GW</b>  |
|   |  |                                   | sinon  | <b>Gm<br/>Grave Propre mal<br/>graduée</b>  | <b>GP</b>  |
|   |  | 5 à 12%                           | Diagramme de plasticité :<br><b>Au-dessus de la ligne A</b>  | <b>GA<br/>Grave Argileuse</b>               | <b>GC</b>  |
|   |  |                                   | Diagramme de plasticité :<br><b>Au-dessous de la ligne A</b> | <b>GL<br/>Grave Limoneuse</b>               | <b>GM</b>  |
|   |  | > 12%                             | Double Classement et<br>double symbole                       | <b>GA/GL<br/>Lp/Lt/Ap/At</b>                |  |
|   | <b>Majorité &lt; 2 mm<br/>SABLES</b>   | < 5%<br><b>Sable<br/>Propre</b>   | Cu > 6 et<br>1 < Cc < 3                                      | <b>Sb<br/>Sable Propre bien<br/>gradué</b>  | <b>SW</b>  |
|   |  |                                   | sinon  | <b>Sm<br/>Sable Propre mal<br/>gradué</b>   | <b>SP</b>  |
|   |  | 5 à 12%                           | Diagramme de plasticité :<br><b>Au-dessus de la ligne A</b>  | <b>SA<br/>Sable Argileux</b>                | <b>SC</b>  |
|   |  |                                   | Diagramme de plasticité :<br><b>Au-dessous de la ligne A</b> | <b>SL<br/>Sable Limoneux</b>                | <b>SM</b>  |
|   |  | > 12%                             | Double Classement et<br>double symbole                       | <b>SA/SL<br/>Lp/Lt/Ap/At</b>                |  |
| <b>&lt; 80 <math>\mu\text{m}</math><br/>SOLS FINS</b>   | <b>Détermination des limites de consistance sur la fraction &lt; 0,42 mm :</b> <div data-bbox="406 1137 1197 1675"> <div>Ligne A</div> </div>  |                                   |  |   | <b>At= CH</b><br><b>Ap= CL</b><br><b>Lt= MH</b><br><b>Lp= ML</b><br><b>Ot= OH</b><br><b>Op= OL</b> |
|   | <b>Les dénominations dépendent de la position du point sur le diagramme :</b><br>Argile au dessus de la ligne A, Limon au dessous de la ligne A ;<br>Peu plastique si $W_L < 50$ ; Très plastique si $W_L > 50$<br>Les sols organiques O ont plus de 10% de matières organiques. |                                   |  |   |  |

## Classification USCS/LCPC

## ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTOMETRIE

**1. But :** La sédimentométrie complète l'analyse granulométrique par tamisage, elle donne la répartition des grains de diamètre inférieur à 80  $\mu\text{m}$ .

### 2. Mode opératoire

1. Prendre deux éprouvettes à essais de 1 litre de contenance.

2. Prendre **60  $\text{cm}^3$**  de défloculant et ajouter **440  $\text{cm}^3$**  d'eau distillée pour obtenir une solution de **500  $\text{cm}^3$** .

3. Diviser la solution obtenue (500  $\text{cm}^3$ ) entre les deux éprouvettes à raison de **250  $\text{cm}^3$**  chacune.

4. Prendre l'une des deux éprouvettes et la compléter avec de l'eau distillée jusqu'à 1 litre.



Cette éprouvette sera appelée dorénavant **l'éprouvette B** (l'autre éprouvette sera nommée **l'éprouvette A**).

5. Prendre 20 g de sol.

6. Verser ces 20 g dans le récipient de l'agitateur mécanique et verser dessus une certaine quantité de la solution de **l'éprouvette A**.

7. Procéder à l'agitation mécanique pendant environ 3 min.

8. Verser la suspension dans **l'éprouvette A** (bien rincer le récipient et les ailettes pour ne pas perdre le matériau).

9. Compléter **l'éprouvette A** avec de l'eau distillée jusqu'à 1 litre.

10. Procéder à une homogénéisation de la suspension à l'aide de l'agitateur manuel.

11. Introduire le densimètre dans la suspension et procéder aux lectures (On les appellera **R<sub>i</sub>**).

Les temps de lecture sont : **30'' ; 1 min ; 2 min ; 5 min ; 10 min ; 30 min ; 60 min.**

### Remarques :

- Pour les 5 premières lectures, le densimètre n'est pas retiré de la suspension.
- Après la 5<sup>ème</sup> lecture, une fois celle-ci effectuée, et ça sera le cas pour le reste des lectures, le densimètre est retiré de la suspension, nettoyer et ranger soigneusement.
- Pour reprendre les lectures et à chaque fois, le densimètre est introduit dans la suspension environ 30s avant la lecture.

12. A la fin des lectures, le densimètre est retiré de l'éprouvette A, introduit dans l'éprouvette B.

13. Procéder à la lecture de la densité de la solution de l'éprouvette B (On l'appellera **R<sub>B</sub>**).

14. Retirer le densimètre, le nettoyer et le ranger définitivement.

15. A l'aide du thermomètre, procéder à la lecture de la température de la solution de l'éprouvette B.

### 3. Calculs

Lors de la décantation de grains solides en suspension dans l'eau, les grains les plus gros chutent plus rapidement que les plus petits. La vitesse de chute est directement liée à leur diamètre (loi de Stokes). Cette relation s'écrit:

$$V = g \cdot \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} \cdot D^2$$

- avec :
- V = Vitesse de décantation de la particule
  - g = accélération de la pesanteur
  - $\gamma_s$  = poids spécifique de la particule (valeur moyenne : 26.5 kN/m<sup>3</sup>)
  - $\gamma_w$  = poids spécifique de l'eau ( $\gamma_w = 10$  kN/m<sup>3</sup>).
  - $\eta$  = viscosité du liquide de décantation [poise]
  - D = diamètre de la particule

#### Calcul du diamètre des particules non décantées

Le diamètre des particules est tirée de la relation de Stokes :

$$D = K \sqrt{\frac{H_r}{t}} \quad \text{avec} \quad K^2 = \frac{18 \eta}{\gamma_s - \gamma_w}$$

- avec :
- $H_r$  = profondeur du centre de poussée dans la suspension à l'instant t
  - t = temps de lecture

#### ▪ Calcul de la profondeur du centre de poussée

$$H_r = H - 100 \cdot H_1 \cdot (R_c - R_t) - H_c$$

- avec :
- H = hauteur séparant le milieu du bulbe du densimètre de la graduation 1,0000 (H = 22,2 cm)
  - $H_1$  = la distance séparant la graduation 1,0000 de la graduation 1,0100 ( $H_1 = 3,8$  cm)
  - R = la lecture du densimètre (sommet du ménisque) à l'instant t
  - $R_t$  = la lecture du densimètre dans l'éprouvette témoin
  - $C_m$  = la correction due au ménisque
  - $H_c$  = la hauteur de déplacement de la solution due au densimètre
    - \*  $H_c = 0$  pour les trois premières lectures
    - \*  $H_c = 0,5 V_d/A = 1,4$  cm ( $V_d$ : volume du densimètre et A : l'aire de la section droite de l'éprouvette)

#### ▪ Viscosité

Le tableau ci-dessous donne la viscosité dynamique de l'eau en fonction de la température :

| Température [°C] | Viscosité [ $10^{-3}$ Pa.s] | Température [°C] | Viscosité [ $10^{-3}$ Pa.s] | Température [°C] | Viscosité [ $10^{-3}$ Pa.s] |
|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| 12               | 1,235                       | 18               | 1,053                       | 24               | 0,9111                      |
| 13               | 1,202                       | 19               | 1,027                       | 25               | 0,8904                      |
| 14               | 1,169                       | 20               | 1,002                       | 26               | 0,8705                      |
| 15               | 1,139                       | 21               | 0,9779                      | 27               | 0,8513                      |
| 16               | 1,109                       | 22               | 0,9548                      | 28               | 0,8327                      |
| 17               | 1,081                       | 23               | 0,9325                      | 29               | 0,8148                      |

Corrections

La lecture effectuée sur le densimètre à un instant  $t$  doit intégrer un certain nombre de corrections :

- ☒  $C_t$  : la correction due aux variations de la température
- ☒  $C_m$  : la correction due à la hauteur du ménisque
- ☒  $C_d$  : la correction due au défloculant

La lecture corrigée prend en compte l'ensemble de ces corrections et s'exprime par :

$$R_c = R + \text{Cor} \quad \text{avec} \quad \text{Cor} = C_t + C_m + C_d$$

**N. B.** Le diamètre  $D$  déterminé par la loi de Stokes est un diamètre de particule sphérique. Les grains ayant à priori une forme quelconque, le diamètre calculé est dit équivalent.

**Calcul du pourcentage des particules non décantées (non sédimentées)**

On exprime le pourcentage «  $p$  » des grains de diamètre inférieur à «  $D$  » qui sont encore

$$\text{en suspension à l'instant } t : p = \frac{V'}{m} \times \frac{\gamma_s}{\gamma_s - R_t \cdot \gamma_w} \times \gamma_w \times [R_c - R_t]$$

- avec :
- $V'$  = volume de la suspension
  - $m$  = masse de la prise d'essai
  - $R_c$  = la lecture corrigée du densimètre à l'instant  $t$
  - $R_t$  = la lecture du densimètre dans l'éprouvette témoin à l'instant  $t$

**Exemple de calcul**

Dans cet exemple, pour des raisons pratiques et de disponibilité, la prise d'essai est de 20 g, et l'éprouvette a une capacité de 1 litre. Les corrections sur la lecture ne sont pas prises en considération ( $\text{Cor} = 0$ ).

**(1) Calcul de  $D$** 

$$D = K \sqrt{\frac{H_r}{t}}$$

$$K^2 = \frac{18 \eta}{\gamma_s - \gamma_w}$$

$$R_c = R = 1,007$$

$$R_t = 0,997$$

$$t = 2 \text{ min}$$

$$H_r = H - 100 \cdot H_1 \cdot (R_c - R_t) - H_c = 22,2 - 100 \times 3,8 (1,007 - 0,997) - 0 = 18,4 \text{ cm}$$

$$\theta = 18^\circ \Rightarrow \eta = 1,053 \times 10^{-3} \text{ Pa.s} \Rightarrow K = 1,071 \times 10^{-3}$$

$$D = 1,071 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{0,1840}{120}} = 41,9 \times 10^{-6} \text{ m} = 42 \mu\text{m}$$

**(2) Calcul de  $p$** 

$$p = \frac{V'}{m} \times \frac{\gamma_s}{\gamma_s - R_t \cdot \gamma_w} \times \gamma_w \times [R_c - R_t]$$

$$V' = 1000 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3 = 26,5 \times 10^3 \text{ N/m}^3$$

$$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3 = 10^4 \text{ N/m}^3$$

$$m = 20 \text{ g} = 20 \times 10^{-3} \text{ kg} = 0,02 \text{ N}$$

$$p = \frac{10^{-3}}{0,02} \times \frac{26,5 \times 10^3 \times 10^4}{26,5 \times 10^3 - 0,997 \times 10^4} \times [1,007 - 0,997] = 80 \%$$

**5. Compte rendu :** Compléter le tableau et tracer la courbe.

## **MESURE DE LA DENSITE DES GRAINS SOLIDES $G_s$**

**1. But:** Détermination de la masse volumique, du poids volumique ou la densité des grains solides d'un sol.

**2. Principe de la manipulation :** Cette manipulation utilise le principe du pycnomètre. Ce procédé consiste à peser un pycnomètre vide, puis rempli d'eau puis rempli d'eau et contenant en même temps une certaine quantité du sol. Par comparaison avec la densité de l'eau, on arrive à déterminer la densité des grains formant le sol.

### **3. Mode opératoire :**

1. Prendre un pycnomètre vide et s'assurer qu'il est sec.
2. Peser ce pycnomètre : **masse  $m_1$** .
3. Prendre environ 25 g d'un sol préalablement séché
4. Verser cette quantité du sol dans le pycnomètre et peser de nouveau le pycnomètre : **masse  $m_2$** .
5. Remplir le pycnomètre à moitié avec de l'eau distillée et placer le tout sur la plaque chauffante.
6. Arrêter le chauffage quand l'eau est portée à ébullition.
7. Laisser refroidir.
8. Compléter avec de l'eau distillée jusqu'à la graduation 250 cm<sup>3</sup> (On veillera à verser l'eau doucement sur les parois pour ne pas recharger l'eau avec de l'air) puis peser de nouveau le pycnomètre : **masse  $m_3$** .
9. Nettoyer le pycnomètre, le remplir avec de l'eau jusqu'à la graduation 250 cm<sup>3</sup> et peser de nouveau : **masse  $m_4$** .

### **4. Calcul**

La densité des grains solides  $G_s$  du sol est donnée par:

$$\frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_1 - m_3 + m_2}$$

|   |  |
|---|--|
| Pycnomètre vide « $m_1$ »                         |  |
| Pycnomètre + matériau « $m_2$ »                   |  |
| Pycnomètre + matériau + eau « $m_3$ »             |  |
| Pycnomètre + eau « $m_4$ »                        |  |
| MASSE VOLUMIQUE DES GRAINS SOLIDES « $\rho_s$ »   |  |
| POIDS VOLUMIQUE DES GRAINS SOLIDES « $\gamma_s$ » |  |
| DENSITE DES GRAINS SOLIDES « $G_s$ »              |  |

**5. Compte rendu :** Il vous est demandé de :

1. Réaliser deux essais.
2. Dresser le tableau des résultats.
3. Comparer vos résultats avec les valeurs usuelles répertoriées dans le tableau suivant :

| Matériaux        | $G_s$ |
|------------------|-------|
| Gravier, sable   | 2,70  |
| Sable limoneux   | 2,69  |
| Limon            | 2,72  |
| Argile limoneuse | 2,77  |
| Argile           | 2,83  |

Valeurs de  $G_s$  pour quelques matériaux



## BLEU DE METHYLENE

**1. But:** Mesurer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour saturer un sol. Cette dernière est directement liée à la surface spécifique qui est elle-même reliée à l'activité du sol.

**2. Principe de la manipulation** Consiste à doser une prise d'essai mise en suspension avec du bleu de méthylène. A saturation, une goutte de la suspension déposée sur du papier filtre provoque la formation d'une tâche avec une auréole.

### 3. Mode opératoire

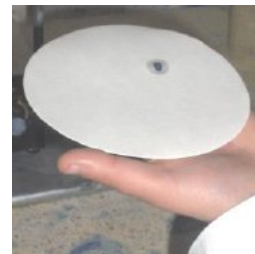
1. Prendre 10 grammes de sol sec passé au tamis 5mm.
2. Mettre la prise d'essai à tremper dans un bécher avec 100 cm d'eau.
3. A l'aide de l'agitateur (700 tr/min), disperser la suspension pendant 5 min.
4. A l'aide du dispositif de dosage, introduire 5 cm<sup>3</sup> de bleu et agiter (400 tr/min) pendant 1 min.
5. A l'aide d'une baguette, déposer une goutte de la suspension sur du papier filtre (l'essai de la tâche).



### Test négatif

6. Si le test est négatif (tâche sans auréole), ajouter 5 cm<sup>3</sup> de bleu et refaire l'essai de la tâche (Opération 5) après une minute.

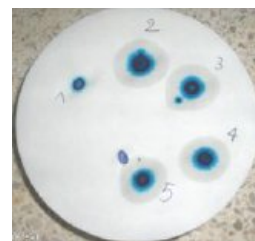
Cette opération sera répétée autant de fois qu'il sera nécessaire jusqu'à ce que le test de la tâche soit positif (tâche avec auréole).



### Test positif

7. Si le test est positif (tâche avec auréole), procéder à **5 essais successifs** (un test par minute) sans ajouter de bleu. Si les 5 essais sont positifs, l'essai est terminé.

8. Si au cours de ces tests de la tâche, l'une des tâches deviendra sans auréole, ajouter uniquement **2,5 cm<sup>3</sup>** et reprendre les tests de la tâche jusqu'à ce que les **5 essais soient positifs**.



Test négatif



Test positif

**Remarque :**

Pendant tout le déroulement de l'essai, l'agitation n'est jamais interrompue.

**4. Calcul**

La valeur du bleu du sol est (sans unité) :

$$VBS = \frac{V}{m}$$

Avec V : Volume du bleu ajouté en cm<sup>3</sup>.

m : La prise d'essai

La surface spécifique totale de la prise d'essai est donnée par :

$$SST \left( m^2 / g \right) = 20,93 \times VBS$$

La surface spécifique est le rapport de la surface totale des grains à leurs volumes parfois à leurs poids (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ou m<sup>2</sup>/Kg). Elle est de l'ordre de 10 à 20 m<sup>2</sup>/g pour la kaolinite et de l'ordre de 500 m<sup>2</sup>/g pour la montmorillonite.

**Compte rendu :** Il vous est demandé de :

1. Déterminer la valeur de V
2. Calculer VBS et SST.
3. Donner la nature du sol suivant la classification suivante :

| Valeur du bleu du sol | Nature du sol          |
|-----------------------|------------------------|
| < 0,2                 | Sols sableux           |
| 0,2 – 2,5             | Sols limoneux          |
| 2,5 – 6               | Sols limoneux-argileux |
| 6 – 8                 | Sols argileux          |
| > 8                   | Sols très argileux     |

## MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE DES SOLS PAR PESEE HYDROSTATIQUE

**1. But :** La détermination de la masse volumique, du poids volumique ou la densité d'un échantillon de sol.

**2. Principe de la manipulation :** Consiste à peser un échantillon de sol puis de déterminer son volume par une pesée dans l'eau. Pour éviter que l'échantillon ne se détériore dans l'eau, on l'enduit de paraffine. La densité de la paraffine étant connue ( $d=0.88$ ), on peut par une simple pesée, déduire le volume de la paraffine et déterminer le volume de l'échantillon.

### 3. Mode opératoire :

1. Prendre un échantillon de sol et le peser (**masse  $m_1$** ).
2. Allumer la résistance pour faire fondre la paraffine.
3. Enduire l'échantillon de paraffine (On fera attention à ce que tout l'échantillon soit recouvert de paraffine).
4. Peser l'échantillon paraffiné (**masse  $m_2$** ).
5. Vérifier que la balance est en équilibre (Le poids de la corbeille doit être équilibré avant la pesée dans l'eau).
6. Plonger l'échantillon paraffiné dans l'eau et peser le dans l'eau (**masse  $m_3$** ).



### 4. Calcul

- Volume de la paraffine :

$$V_p = \frac{m_2 - m_1}{d \cdot \rho_w}$$

- Volume de l'échantillon paraffiné :

$$V_{(cp)} = \frac{(m_2 - m_3) \cdot g}{g \cdot \rho_w} = \frac{(m_2 - m_3)}{\rho_w}$$

- La masse volumique totale (humide) de l'échantillon:

$$\rho = \frac{m_1}{V_e} = \frac{m_1}{V_{(cp)} - V_p}$$

### 5. Compte rendu : Il vous est demandé de :

1. Réaliser l'essai.
2. Dresser le tableau des résultats.
3. Commenter vos résultats.

## DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG

### 1) Définitions

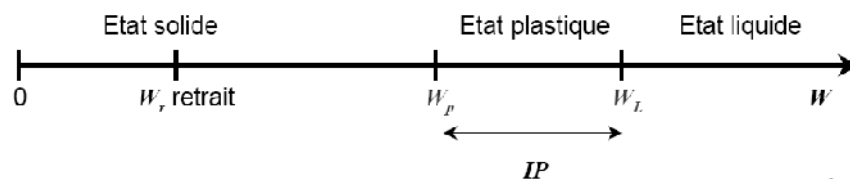
Dans les sols fins, ou cohérents, où la surface spécifique des grains (rapport de la surface du grain à son volume) est grande, l'eau joue un rôle très important par son influence sur les forces qui s'exercent entre les particules.

Selon la valeur de la teneur en eau, les propriétés mécaniques d'un sol fin évoluent depuis celle d'un solide ( $w$  faible) jusqu'à celle d'un liquide ( $w$  élevé). Entre ces deux états, pour les teneurs en eau moyennes, le sol présente des propriétés plastiques, c'est-à-dire qu'il est capable de se déformer rapidement et considérablement sans se casser, se fendiller ou changer de volume et sans présenter de déformation réversible notable.

L'état solide peut lui-même être séparé en deux états : un état dans lequel l'eau adsorbée est encore en place, appelé état solide avec retrait ; et un état dans lequel toute l'eau adsorbée a disparu, appelé état solide sans retrait. Le retrait est une diminution du volume qui accompagne l'élimination de l'eau adsorbée.

Pour les sols fins, on définit :

- ☒ Une limite de retrait «  $w_r$  » qui sépare l'état solide sans retrait de l'état solide avec retrait.
- ☒ Une limite de plasticité «  $w_p$  » qui sépare l'état plastique de l'état solide.
- ☒ Une limite de liquidité «  $w_L$  » qui sépare l'état plastique de l'état liquide.



Ces limites sont désignées sous le nom de limites d'Atterberg. Elles ont été élaborées au début du XX<sup>ème</sup> siècle par A. Atterberg, un pédologue suédois, qui s'intéressait à la plasticité des argiles en vue de la fabrication des produits céramiques. Les essais mis au point à cette époque ont été repris et modifiés par Casagrande, afin que leur interprétation puisse permettre d'établir un lien entre la teneur en eau du sol et son comportement.

Ces caractéristiques sont complétées par :

- ☒ L'indice de plasticité : «  $I_p = w_L - w_p$  »  
avec  $w$  : la teneur en eau à l'état naturel
- ☒ L'indice de consistance : «  $I_c = \frac{w_L - w}{I_p}$  »

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

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

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

- ☒ L'indice de liquidité : «  $I_L = \frac{w - w_p}{I_p}$  »

Les valeurs des limites de  $w_L$ ,  $w_p$  et  $I_p$  sont fonctions de la proportion et de l'activité des particules argileuses. L'activité «  $A_c$  » se définit comme suit :

$$\ll A_c = \frac{I_p}{\% \text{ des éléments inférieurs à } 2 \mu\text{m}} \gg$$

## 2) But et principe

Les résultats obtenus à partir de ces essais permettent de prévoir le comportement des sols sous l'action des variations des teneurs en eau.

L'essai s'effectue en deux phases :

- (1) Recherche de la teneur en eau  $w_L$  pour laquelle une rainure de dimension normalisée, pratiqué dans le sol disposé dans la coupelle de Casagrande, se ferme sous l'action de 25 chocs appliqués de manière normalisée.
- (2) Recherche de la teneur en eau  $w_p$  pour laquelle un cylindre de sol de diamètre 3 mm, confectionné manuellement, se fissure lorsqu'on le soulève.

## 3. Détermination de la limite de liquidité :

1. Prendre environ 200 g de sol préalablement tamisé au tamis 0,4 mm.
2. Malaxer le sol avec une de l'eau afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.
3. Prendre une partie de la pâte et l'étaler dans la coupelle de l'appareil de Casagrande à l'aide de la spatule.
4. Pratiquer une rainure dans cette pâte afin de la diviser en deux. L'outil à rainurer devra être tenu perpendiculairement à la coupelle en présentant sa partie biseautée face à la direction du mouvement.
5. Soumettre la coupelle et le matériau qu'elle contient à des chocs répétés avec une cadence de 2 coups par seconde.
6. Arrêter les chocs quand les deux lèvres se rejoignent sur environ 2 cm, noter le nombre de coups  $N$  correspondant.
7. Prélever des deux côtés des lèvres à l'endroit où elles se sont refermées environ 5 g de sol afin d'en déterminer la teneur en eau.
8. Homogénéiser le sol et le sécher un peu puis reprendre les opérations de 3 à 7. Il faut au moins trois essais avec un nombre de coups croissant et de préférence bien étalé entre 15 et 35.



#### **4. Détermination de la limite de plasticité :**

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

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

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

#### **5. Calculs:**

- Pour le calcul de la limite de liquidité, on applique la relation:

$$W_L = \omega_N \cdot \left( \frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

$\omega_N$  est la teneur en eau correspondant au nombre de coups N.  
On fera la moyenne des trois essais.

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

#### **6. Compte rendu :** Il vous est demandé de :

1. Dresser les tableaux des résultats.
2. Calculer l'indice de plasticité  $I_p$
3. Classifier le sol selon la classification LCPC pour les sols fins (voir TP analyse granulométrique par tamisage)

## ESSAI DE COMPACTAGE PROCTOR NORMAL

**1. Définition :** Le compactage est l'ensemble des mesures prises pour augmenter la densité apparente sèche du sol traité. Ce qui conduit à réduire son volume apparent (par diminution de l'indice des vides).

Cette densification n'est pas un but en soi. Elle est recherchée parce qu'elle entraîne d'autres conséquences :

- La limitation des tassements.
- La diminution de la perméabilité de la couche traitée afin de s'opposer à l'écoulement de l'eau,
- L'amélioration des caractéristiques mécaniques : résistance à la compression et au cisaillement.

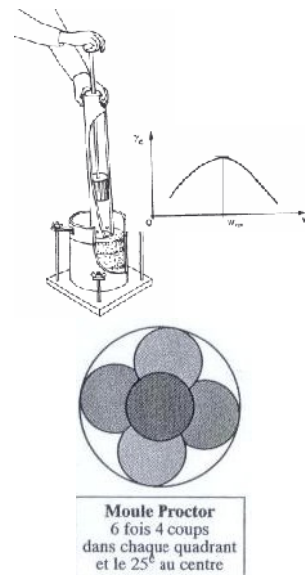
**2. Principe de la manipulation:** L'essai Proctor permet de tracer la courbe du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau, pour une énergie de compactage donnée. Cette courbe permet de mettre en évidence un optimum de poids volumique.

- En construction de remblai en grande masse (barrages, remblais routiers...) on se réfère presque exclusivement à l'essai Proctor Normal ;
- En couches de chaussée on se réfère presque exclusivement à l'essai Proctor Modifié, réalisé avec une énergie supérieure. Cet essai permet de déterminer deux grandeurs fondamentales, en particulier pour le déroulement et le contrôle des chantiers de terrassement :

- $w_{OPN}$  (ou  $w_{OPM}$ ) teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal (ou Modifié) ;
- $\gamma_{dOPN}$  (ou  $\gamma_{dOPM}$ ) poids volumique sec à l'Optimum Proctor Normal (ou Modifié).

### 3. Mode opératoire de l'essai Proctor normal:

1. Peser 3 kg de sol sec.
2. Ajouter une quantité d'eau afin que  $w$  de départ soit connue.
3. Diviser la quantité de sol en 3 parties égales.
4. Peser le moule vide sans la hausse.
5. Placer la hausse.
6. Verser la 1<sup>ère</sup> partie du sol et compacter (25 coups selon le schéma).
7. Refaites la même chose pour les 3 couches.
8. Enlever la hausse du moule et araser au niveau supérieur du moule.
9. Peser le moule rempli.
10. vider le moule de son contenu.
11. Rajouter 2 % de teneur en eau et bien homogénéiser le sol.
12. Refaites l'opération (de l'étape 5 à 10) 5 à 6 fois afin de tracer une courbe sous forme de cloche.



#### 4. Calcul

Tracer un tableau contenant :

| $\omega_{initiale}$ | Poids du moule avec sol humide | $W = \text{poids moule avec sol} - \text{poids moule}$ | $\gamma_h = W/V_{\text{moule}}$ | $\gamma_d = \gamma_h / (1 + \omega)$ |
|---------------------|--------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------------|
|---------------------|--------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------------|

#### 5. Compte rendu : Il vous est demandé de :

1. Calculer le volume du moule et mesurer son poids vide.
2. Dresser le tableau des résultats pour chaque point effectué.
3. Tracer la courbe  $(\omega, \gamma_d)$ .
4. Déterminer le couple  $(\omega, \gamma_d)$  à l'optimum.
5. Dédire la valeur du degré de saturation  $S_r$  à l'optimum en sachant que  $G_s = 2.7$



## MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE SECHE IN SITU

**1. But :** La détermination de la masse volumique sèche du sol in situ.

**2. Principe des manipulations :**

**2.1 Densitomètre à membrane :**

Le principe de cet essai est de creuser un trou dans le sol, de recueillir le matériau pour le peser. Le volume du trou est mesuré à l'aide d'une membrane rempli d'eau qui va épouser la forme du trou.

**2.2 Le carottier :**

Le principe de cet essai consiste à enfoncer un carottier dans le sol. La masse du sol est déterminée par pesée alors que son volume est déterminé par mesure des dimensions du carottier.

**3. Mode opératoire du densitomètre à membrane :**

1. Vérifier que le densitomètre est plein d'eau.  
2. Choisir une surface plane du sol et fixer le densitomètre à l'aide des clous prévus à cet effet.

3. Fixer le densitomètre.

4. Séparer le densitomètre de sa base carrée.

5. Enlever la plaque circulaire de protection.

6. Remonter le densimètre sur sa base carrée, pousser modérément sur les poignets : Noter le volume  $V_0$  puis tirer sur les poignets vers le haut pour faire remonter la membrane.

7. Séparer de nouveau le densimètre de sa base carrée.

8. Creuser un trou d'environ 500 cm<sup>3</sup> dans le cercle central et recueillir le matériau pour le peser : **masse m.**

9. Remonter le densimètre sur sa base carrée et pousser de nouveau sur les poignets : Noter le volume  $V_1$  puis tirer sur les poignets vers le haut pour faire remonter la membrane.

10. Détacher l'appareil du sol, le nettoyer et le ranger.



**4. Calcul :**

- La masse volumique total (humide) du sol est donnée par :

$$\rho = \frac{m}{V_1 - V_0}$$

- La masse volumique sèche du sol est donnée par :

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + \omega} \text{ Avec } \omega : \text{teneur en eau de l'échantillon à déterminer.}$$

## 5. Mode opératoire du carottier

1. Se placer à côté de l'endroit où l'essai précédent a été réalisé et nettoyer un peu la surface du sol.
2. A l'aide d'un marteau, enfoncer le carottier dans le sol. Ne s'arrêter que quand le matériau sorte des deux trous percés dans la base du carottier.
3. Dégager le carottier du sol.
4. Araser le matériau en excès et peser le tout : **masse  $m_1$** .
5. Vider le carottier du matériau et peser le : **masse  $m_2$** .
6. A l'aide d'un pied à coulisse, déterminer les dimensions du carottier.



## 6. Calcul:

- La masse volumique total (humide) du sol est donnée par :

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V_c}$$

Avec  $V_c$  : Volume du carottier.

- La masse volumique sèche du sol est donnée par :

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + \omega} \text{ Avec } \omega : \text{teneur en eau de l'échantillon à déterminer.}$$

## 5. Compte rendu : Il vous est demandé de :

1. Réaliser les deux essais.
2. Dresser les tableaux des résultats.
3. Comparer entre les résultats des deux méthodes (densitomètre et carottiers).