



RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Centre Universitaire Maghnia, Institut des Sciences et de la
Technologie, Département d'Hydraulique et de Génie Civil



TP de Mécanique des sols

Conformément au nouveau programme du ministère de
l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

3ème Année Licence
Filière : Hydraulique

Par :
Dr. GUIZ Amine

Avant-propos

La mécanique des sols joue un rôle essentiel dans l'acte de construire pour tous les travaux de génie civil, de travaux public et d'hydraulique. On peut citer : les fondations des ouvrages des bâtiments, ponts, usines, silos ; les ouvrages de soutènement ; la stabilité des pentes naturelles et des talus ; les terrassements : routes, autoroutes, voies ferrées ; les V.R.D et chaussées ; les tunnels et travaux souterrains ; les barrages et notamment digues et barrages en terre ; les ouvrages fluviaux, portuaires et maritimes ; l'hydrogéologie et la protection de l'environnement.

Identifier un sol c'est connaître sa nature, sa composition et son comportement vis-à-vis de certains phénomènes. Autrement dit c'est déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques ou chimiques qui permettent de le caractériser. Ces propriétés sont déterminées par des essais simples et rapides appelés essais d'identification.

L'importance de l'étude des propriétés des sols doit s'imposer à l'esprit de celui qui est responsable de la conception ou de la construction d'un ouvrage quelconque impliquant l'utilisation de sols. Cette étude nécessitera généralement beaucoup plus d'efforts et de temps de la part de l'ingénieur et du technicien que ceux-ci devront en consacrer à l'étude des autres matériaux habituellement employés en génie civil, tels que l'acier et le béton qui sont des matériaux d'une simplicité notoire comparés aux sols.

Ce polycopié est destiné aux étudiants de 3ème année Licence Hydraulique. Il présente les éléments fondamentaux de la mécanique des sols et comporte le nécessaire pour faire la pratique en termes de principes, méthodes, formules, tables et abaques.

Le document est organisé en cinq chapitres, chaque chapitre expose une où des manipulations, accompagnées par un exemple de calcul à la fin du chapitre.

Programme officiel de la matière TP de Mécanique des sols selon le canevas de formation Licence Hydraulique

TP 1 : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau)

TP 2 : Mesure des paramètres de consistance (limites d'Atterberg) (NF P 94-051)

TP 3 : Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)

TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)

TP 5 : Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane

Table des matières

Avant-propos.....	i
Programme officiel de la matière TP de Mécanique des sols selon le canevas de formation Licence Hydraulique	i
Liste des Figures.....	i
Liste des tableaux	i
Notations utilisées.....	i
TP 1 : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau).....	1
1. Détermination de la teneur en eau des grains	2
1.1. Définition :	2
1.2. Principe de l'essai :	2
1.3. Mode opératoire :	2
1.4. Exemple de calcul :	3
2. Détermination de la masse volumique des grains	3
2.1. Définition :	3
2.2. Mode opératoire :	4
TP 2 : Mesure des paramètres de consistance (limites d'Atterberg)	6
1. Objectif :	7
2. Mode opératoire :	7
2.1. Limite de liquidité :	7
2.2. Limite de plasticité :	8
3. Exemple de calcul :	10
TP 3 : Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)	12
I. Analyse granulométrique par tamisage	13
1. Objectif :	13
2. Mode opératoire :	13
3. Exemple de calcul	14
II. Analyse granulométrique par Sédimentométrie	16
1. Objectif :	16
2. Mode opératoire :	16
TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)	20

1. Introduction :	21
2. Principe de l'essai :	21
3. Equipements et matériaux :	22
4. Procédure de l'essai :	22
5. Expression des résultats :	24
5.1. Calculs préparatoires :	24
5.2. Tracé du graphe :	24
6. Exemple de calcul :	25
7. Conclusion :	28
TP 5 : Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane	30
1. Introduction :	31
2. Principe de l'essai :	31
3. Equipements et matériaux :	31
4. Procédure de l'essai :	32
5. Expression des résultats :	33
6. Exemple de calcul :	33
7. Conclusion :	34
Références	35
Annexe1 – Classification LPC/USCS des sols en laboratoire	36
Annexe 2 – Classification des sols LPC modifiée (1974/1980)	37

Liste des Figures

Figure 1 Matériels utilisés dans l'essai de limite d'Atterberg	8
Figure 2 Tamiseuse à vibration	14
Figure 3 Matériel utilisé pour l'analyse granulométrie par sédimentométrie	17
Figure 4 Moule et dame de l'essai Proctor normal	22
Figure 5 Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche dans un moule Proctor normal	23
Figure 6 Echantillon du sol à la fin de compactage	24
Figure 7 Courbe de compactage essai Proctor normal ($\rho_d=f(w)$)	25
Figure 8 Courbe de compactage de Proctor normal	28
Figure 9 Densitomètre à membrane	32
Figure 10 Procédure de l'essai de densitomètre à membrane	33

Liste des tableaux

Tableau 1 Norme utilisées pour la caractérisation des matériaux étudiés	i
Tableau 2 Récapitulatif résultats	3
Tableau 3 Caractéristiques techniques du matériau utilisé pour un essai Proctor	25
Tableau 4 Les résultats obtenus lors de l'essai Proctor normal	26
Tableau 5 Résultats de la mesure de la teneur en eau lors de l'essai de Proctor normal	26
Tableau 6 Résultats de l'essai de compactage Proctor normal	27

Notations utilisées

$\omega(\%)$: Teneur en eau

M_h : Masse du sol humide

M_s : Masse du sol sec (après séchage)

M_w : Masse de l'eau évaporée

V : Volume total du sol

ρ_h : Masse volumique humide

ρ_s : Masse volumique des particules solides du sol

ρ_d : Masse volumique sèche

ρ_w : Masse volumique de l'eau

W_L : Limite de liquidité

W_P : Limite de plasticité

N : Nombre de coups utilisé pour la détermination de la limite de liquidité

I_P : Indice de plasticité

I_C : Indice de consistance

D_{10} : Diamètre effectif des particules qui correspond à 10% du passant

D_{30} : Diamètre effectif des particules qui correspond à 30% du passant

D_{60} : Diamètre effectif des particules qui correspond à 60% du passant

C_u : Coefficient d'uniformité

C_c : Coefficient de courbure

V : Vitesse de décantation de la particule

d : Diamètre de la particule

μ : Viscosité dynamique du liquide

R_1 : Lecture corrigée

n : Nombre de graduation*0.0005 (0.0005 étant la valeur d'une graduation)

C_t : Correction due à la variation de la température au cours de l'essai

C_m : Correction due au ménisque

C_d : Correction due au dé flocculant

V_s : Volume de la suspension

R_1 : Lecture corrigée de l'éprouvette A

R_2 : Lecture de l'éprouvette B (éprouvette témoin)

t : est le temps de lecture en minute

H_R : Profondeur effective du centre de poussée du densimètre en centimètre

H_c : Déplacement de la suspension dû à l'introduction du densimètre

ρ_{dmax} : Masse volumique sèche maximale

ω_{opt} : Teneur en eau optimale

V_i : Volume initial

V_f : Volume final

Tableau 1 Norme utilisées pour la caractérisation des matériaux étudiés

Propriétés	Norme et méthode
Teneur en eau	Norme NF P94-050, Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage, (1993)
Masse volumique absolue	Norme NF P94-054, Sols : Reconnaissance et essais détermination de la masse volumique des particules solides des sols –méthode du pycnomètre à eau), (1993)
Limites d'Atterberg	Norme NF P94-051, Sols : reconnaissance et essais détermination des limites d'Atterberg limite de liquidité à la coupelle _ limite de plasticité au rouleau), (1993)
Sédimentométrie	Norme NF P94-057, Sols : reconnaissance et essais analyse granulométrique méthode par sédimentation, (1993)
Equivalent de sable	Norme NFP 18-598, Granulats : Equivalent de sable, (1979)
Proctor normale et modifier	Norme NF P 94-093, Sols : Reconnaissance et essais Détermination des références de compactage d'un matériau- Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié, (1993)

**TP 1 : Mesure des caractéristiques pondérales
(masse volumique – teneur en eau)**

1. Détermination de la teneur en eau des grains

1.1. Définition :

La teneur en eau pondérale d'un matériau est un rapport de la masse de l'eau évaporée lors de l'étuvage (m_h) sur la masse des grains solides (m_s) exprimée en pourcentage %.

$$\omega(\%) = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (1.1)$$

Où :

m_h : Poids de l'échantillon humide.

m_s : Poids de l'échantillon sec.

1.2. Principe de l'essai :

L'essai consiste à déterminer la masse d'eau qui s'est évaporée après un séchage d'une masse de sol connue (masse humide) dans une étuve et de la rapporter à la masse sèche du même sol.

1.3. Mode opératoire :

L'échantillon de matériau est pesé, puis placé dans une étuve. Une fois la dessiccation réalisée, l'échantillon est pesé à nouveau.

Les deux pesées donnent par différence la masse d'eau évaporée.

Les pesées séparées par un étuvage d'un intervalle de temps t , sont effectuées sur la prise d'essai après chacun des passages à l'étuve. Conventionnellement l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse (m_s) de la prise d'essai n'a pas variée de plus de 2/1000 entre les deux pesées successives.

L'intervalle t est un minimum :

- De 4 h dans le cas d'un étuvage à 105°C,
- De 8 h dans le cas d'un étuvage à 50°C.

La teneur en eau exprimée en pourcentage (%) est calculée par la relation suivante :

$$\omega(\%) = \frac{M_w}{M_s} * 100 = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} * 100 \quad (\%) \quad (1.2)$$

TP 1 : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau)

M_w : Masse de l'eau évaporée ;

M_s : Masse du sol sec (après séchage) ;

M_1 : Masse du récipient ;

M_2 : Masse du sol humide + masse du récipient ;

M_3 : Masse du sol sec + masse du récipient.

Les données de l'essai sont récapitulées dans un tableau comme suit :

Tableau 2 Récapitulatif résultats

Paramètre	Valeur
Masse du matériau naturel humide (M)	Connue
Masse du récipient (M_1)	Connue
Masse du récipient + sol naturel humide (M_2)	à déduire
Masse du récipient + sol sec (M_3)	à déterminer
Teneur en eau $\omega(\%) = \frac{M_w}{M_s} * 100 = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} * 100$	Valeur recherchée

1.4. Exemple de calcul :

Un échantillon de sol a une masse humide de 1540g, après passage à l'étuve sa masse n'est plus que 1055g.

Calcul de la teneur en eau (ω)

$$\omega = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 = \frac{1540 - 1055}{1055} \times 100 = 45.97\%$$

2. Détermination de la masse volumique des grains

2.1. Définition :

La masse volumique des particules solides du sol (ρ_s) est le quotient de la masse de ces particules solides (m_s) par leur volume (V_s).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (1.3)$$

TP 1 : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau)

La masse des particules solides est obtenue par pesage. Le volume est mesuré au pycnomètre.

2.2. Mode opératoire :

1. Prendre un pycnomètre vide et s'assurer qu'il est sec.
2. Peser le pycnomètre vide : **masse M1**.
3. Prendre environ 25 grammes d'un sol préalablement séché.
4. Verser cette quantité du sol dans le pycnomètre.
5. Peser de nouveau le pycnomètre (le pycnomètre contient maintenant l'échantillon de sol) : **masse M2**.
6. Remplir le pycnomètre à moitié avec de l'eau distillée et placer, le tout sur la plaque chauffante et laisser chauffer (pour dégager les bulles d'air).
7. Arrêter le chauffage quand l'eau est portée à ébullition.
8. Laisser refroidir.
9. Compléter avec de l'eau distillée jusqu'à la graduation 250 cm³ (On veillera à verser l'eau doucement sur les parois pour ne pas recharger l'eau avec de l'air).
10. Peser de nouveau le pycnomètre (le pycnomètre contient maintenant le sol et l'eau jusqu'à la graduation 250 cm³) : **masse M3**.
11. Vider le pycnomètre, le nettoyer et le sécher.
12. Remplir le pycnomètre avec de l'eau distillée jusqu'à la graduation 250 cm³.
13. Peser de nouveau le pycnomètre (le pycnomètre contient maintenant de l'eau jusqu'à la graduation 250 cm³) : **masse M4**.

Où :

$$\rho_s = \rho_w \frac{(M_2 - M_1)}{(M_4 + M_2 - M_1 - M_3)} \quad (1.4)$$

ρ_s : Masse volumique de l'eau conventionnellement prise égale à 1000 kg/m³.

TP 1 : Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau)

Essai	M1	M2	M3	M4	ρ_s	ρ_s
1						
2						

M1 : Masse du pycnomètre vide + bouchon ;

M2 : Masse du pycnomètre + particules solides + bouchon ;

M3 : Masse du pycnomètre + particules solides + eau (rajoutée jusqu'au remplissage du pycnomètre) + bouchon ;

M4 : Masse du pycnomètre + eau (eau totale nécessaire à remplir le pycnomètre) + bouchon ;

ρ_w : Masse volumique de l'eau = 1000 kg/m³.

TP 2 : Mesure des paramètres de consistance (limites d'Atterberg)

TP 2 : Mesure des paramètres de consistance (limites d'Atterberg)

1. Objectif :

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles (teneur en eau pondérale) qui marque les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité W_L)
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité W_P)

Ils servent à classifier les sols fins dont les éléments ont un diamètre $< 400 \mu\text{m}$ et à prévoir leur consistance (I_c), ainsi que leurs comportements pendant les phases de terrassement et / ou lorsqu'ils sont sollicités mécaniquement (contrainte admissible, module d'élasticité).

2. Mode opératoire :

L'essai se fait en deux phases :

- Détermination de la limite de liquidité : Utilisation de l'appareil de Casagrande.
- Détermination de la limite de plasticité : Essai des petits rouleaux.

2.1. Limite de liquidité :

1. Prendre environ 200 grammes de sol préalablement tamisé au tamis 0,4 mm par voie humide et séchée.
2. Malaxer la totalité de la prise de telle sorte à 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 de telle sorte à 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.

TP 2 : Mesure des paramètres de consistance (limites d'Atterberg)

6. Arrêter les chocs quand les deux lèvres se rejoignent sur environ 1 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 grammes de sol afin d'en déterminer la teneur en eau.
8. Ré 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.



Figure 1 Matériels utilisés dans l'essai de limite d'Atterberg

2.2. Limite de plasticité :

La procédure pour la détermination de la limite de plasticité est la suivante :

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

Trois cas peuvent se présenter :

- Le bâtonnet confectionné 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 la mesurer (c'est une teneur en eau).
- Le sol est encore fluide et vous n'arrivez pas à confectionner le bâtonnet. Il faut sécher un peu le matériau.

TP 2 : Mesure des paramètres de consistance (limites d'Atterberg)

- 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.

Avec :

$$W_L = \omega \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad (2.1)$$

$$\omega(\%) = \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (2.2)$$

W_L : Limite de liquidité,

ω : La teneur en eau du sol au moment de l'essai,

N : Nombre de coups,

m_h : Poids de l'échantillon humide,

m_s : Poids de l'échantillon sec.

$$I_P = W_L - W_P \quad (2.3)$$

$$I_C = \frac{W_L - \omega}{I_P} \quad (2.4)$$

I_P : Indice de plasticité,

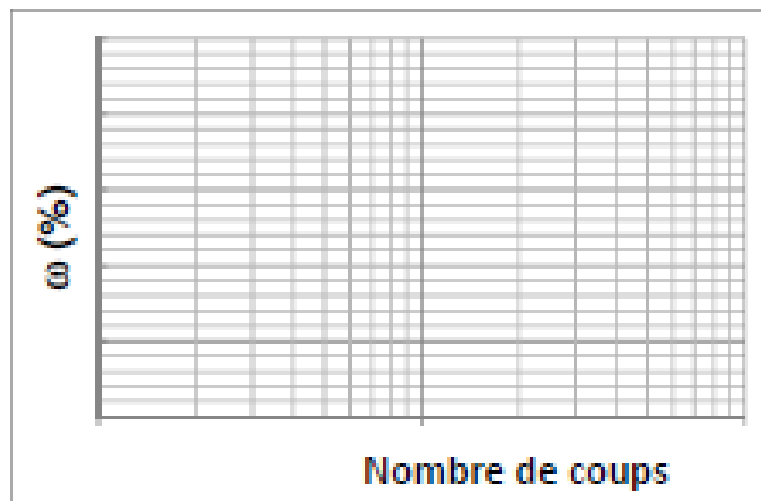
I_C : Indice de consistance.

TP 2 : Mesure des paramètres de consistance (limites d'Atterberg)

3. Exemple de calcul :

▪ *Limite de liquidité :*

Nombre de coups de fermeture	17		21		26		30		34	
N° d'essai	1a	1b	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
Tare + Sol. Hum (g)	9.35	9.68	13.69	12.16	10.11	9.27	10.31	11.08	11.50	9.59
Tare + Sol. Sec (g)	8.79	9.20	11.35	10.19	8.67	8.02	8.84	9.42	9.78	8.31
Poids Tare (g)	7.11	7.77	4.05	4.05	4.10	4.07	4.10	4.10	4.07	4.05
Poids de l'eau (g)	0.56	0.48	2.34	1.97	1.44	1.25	1.47	1.66	1.72	1.28
Sol. Sec (g)	1.68	1.43	7.3	6.14	4.57	3.95	4.74	5.32	5.71	4.26
Teneur en eau %	33.33	33.56	32.05	32.08	34.51	31.64	31.01	31.20	30.12	30.04
Moyenne de la teneur en eau %	<u>33.50</u>		<u>32.10</u>		<u>31.60</u>		<u>31.10</u>		<u>30.10</u>	



a. D'après le graphe : $\omega_L = 31.60\% = 32\%$

b. A l'aide de la formule approchée :

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

TP 2 : Mesure des paramètres de consistance (limites d'Atterberg)

Nombre de coups de fermeture	17	21	26	30	34
Teneur en eau %	33.50	32.10	31.60	31.10	30.10
$W_L = \omega \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121}$	31.825	31.458	31.60	31.72	31.30
$W_{L(\text{moyenne})}$	<u>31.52=31.60%</u>				

▪ *Limite de plasticité :*

Essai	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai	
Tare	A	B	C	D
Tare + Sol. Hum (g)	6.32	6.56	6.54	6.36
Tare + Sol. Sec (g)	5.94	6.15	6.12	5.97
Poids Tare (g)	4.06	4.10	4.07	4.05
Poids de l'eau (g)	0.38	0.41	0.42	0.39
Sol. Sec (g)	1.88	2.05	2.05	1.92
Teneur en eau %	20.21	20	20.49	20.31
Moyenne de la teneur en eau %	20.10		20.40	
W _L	20.25%			

TP 3 : Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)

I. Analyse granulométrique par tamisage

1. Objectif :

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains (particules) constituant le squelette solide d'un sol.

2. Mode opératoire :

1. Commencer par dresser la colonne des tamis. Les ouvertures des tamis doivent être croissantes de bas en haut. N'oubliez pas le fond et le couvercle du tamis.
2. Prendre deux kilogrammes de sol.
3. Verser le sol sur le tamis supérieur puis fermer la colonne par le couvercle.
4. Placer la colonne des tamis sur le vibreur ou procéder à l'agitation de l'ensemble d'une façon manuelle pendant 5 min.
5. Procéder à la pesée cumulée des refus des tamis en commençant par le tamis supérieur.
6. Les résultats seront portés sur le tableau ci-après.

Où :

Refus : représente la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

Tamisât (ou passant) : représente la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par le coefficient d'uniformité (coefficient de Hazen), et le coefficient de courbure:

- a. **Coefficient d'uniformité** : permet d'exprimer l'étalement de la courbe granulométrique :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.1)$$

- b. **Coefficient de courbure** : permet de décrire la forme de la courbe granulométrique :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (3.2)$$

Où:

D_{10} : Diamètre effectif des particules qui correspond à 10% du passant.

D_{30} : Diamètre effectif des particules qui correspond à 30% du passant.

D_{60} : Diamètre effectif des particules qui correspond à 60% du passant.



Figure 2 Tamiseuse à vibration

3. Exemple de calcul

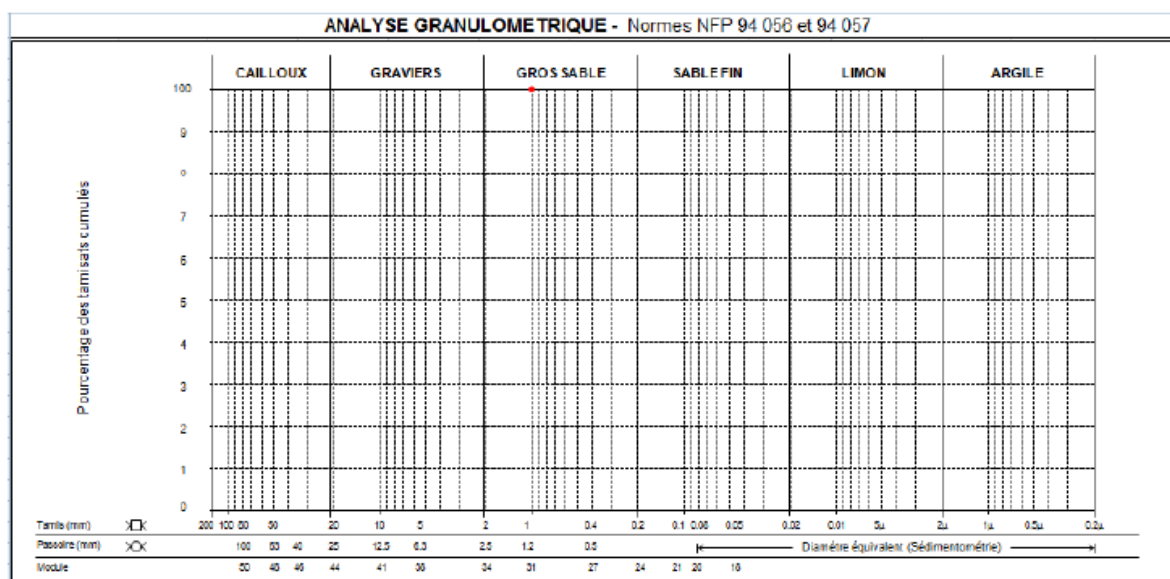
On effectue une analyse granulométrique par tamisage sur 1300g de sable sec. On utilise une colonne de treize tamis, l'ouverture intérieure des mailles et les refus sur chacun de ces treize tamis sont présentés sur le tableau ci-dessous :

Le tamisât du dernier tamis recueillis sur le fond qui ferme la colonne est de 46.37g.

TP 3 : Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)

Poids initial sec :	g		
Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Tamisât cumulé (g)	Tamisât cumulé (%)
5	18.27	1281.73	98.59%
4	5.24	1276.49	98.19%
3.15	5.21	1271.28	97.79%
2.5	8.76	1262.52	97.11%
2	13.98	1248.54	96.04%
1.6	20.65	1227.89	94.45%
1.25	42.2	1185.69	91.21%
08	163.92	1021.77	78.60%
0.5	380.68	641.09	49.31%
0.4	188.99	452.1	34.78%
0.2	278.58	173.52	13.35%
0.125	84.47	89.05	6.85%
0.08	42.68	46.37	3.57%

a. La courbe granulométrique :



b. Les diamètres efficaces :

$$d_{10} = 0.17 \text{ mm}$$

$$d_{30} = 0.38 \text{ mm}$$

$$d_{60} = 0.58 \text{ mm}$$

c. Coefficient d'uniformité :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.58}{0.17} = 3.41$$

c. Coefficient de courbure :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} = \frac{(0.38)^2}{(0.17 * 0.58)} = 1.46$$

II. Analyse granulométrique par Sédimentométrie

1. Objectif :

La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage à sec des sols. C'est un essai de décantation par gravité des grains d'un échantillon mis en suspension dans un liquide visqueux. Elle s'applique à un élément de diamètre inférieur à 80 μm .

2. Mode opératoire :

1. Prendre deux éprouvettes à essais de 1 litre de contenance.
2. Prendre 60 cm^3 de dé flocculant et ajouter 440 cm^3 d'eau distillée pour obtenir une solution de 500 cm^3 .
3. Diviser la solution obtenue (500 cm^3) entre les deux éprouvettes à raison de 250 cm^3 pour 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 dite l'éprouvette A).
5. Prendre 40 grammes de sol.

TP 3 : Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)

6. Verser ces 40 grammes de sol 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 (veillez à bien rincer le récipient et les ailettes de l'agitateur 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_t). Les temps de lecture sont : 30 sec ; 1 min ; 2 min ; 5 min ; 10 min ; 20 min ; 40 min ; 80 min ; 4 h ; 24 h.
12. A la fin des lectures, le densimètre est retiré de l'éprouvette A et introduit dans l'éprouvette B. Procéder à la lecture de la densité de la solution de l'éprouvette B (On l'appellera R_b).
13. Retirer le densimètre, le nettoyer et le ranger définitivement.
14. 1A l'aide du thermomètre, procéder à la lecture de la température de la solution de l'éprouvette B.



Figure 3 Matériel utilisé pour l'analyse granulométrique par sédimentométrie

Attention :

- Pour les trois premières lectures (30 sec ; 1 min ; 2 min), le densimètre n'est pas retiré de la suspension.
- Après la troisième 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.

La loi de STOCKES exprime la relation qui existe entre la vitesse de décantation et le diamètre d'une particule sphérique, elle s'écrit sous la forme suivante :

$$V = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} d^2 \quad (3.3)$$

Où :

V : Vitesse de décantation de la particule.

d : Diamètre de la particule.

γ_s : Poids spécifique de la particule.

γ_w : Poids volumique du liquide utilisé.

μ : Viscosité dynamique du liquide.

Il est nécessaire de connaître au préalable les constantes relatives au densimètre utilisé :

$$R_1 = n + C_t + C_m - C_d \quad (3.4)$$

R_1 : Lecture corrigée

n : Nombre de graduation*0.0005 (0.0005 étant la valeur d'une graduation)

C_t : Correction due à la variation de la température au cours de l'essai.

C_m : Correction due au ménisque.

C_d : Correction due au dé flocculant.

TP 3 : Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)

Le pourcentage des particules qui sont en suspension est donné par :

$$P = \left[1000 \frac{V_s \rho_s}{m \rho_s - \rho_w} \rho_w \right] (R_1 - R_2) \quad (3.5)$$

Où :

V_s : Volume de la suspension

m : Masse de la prise d'essai

ρ_s : Masse volumique des grains solides

ρ_w : Masse volumique de l'eau.

R_1 : Lecture corrigée de l'éprouvette A.

R_2 : Lecture de l'éprouvette B (éprouvette témoin).

Le diamètre des particules qui sont en suspension est donné par :

$$D = F \sqrt{\frac{H_R}{t}} \quad (3.6)$$

Où :

F : est un facteur donné par l'abaque 1.

t : est le temps de lecture en minute.

H_R : est la profondeur effective du centre de poussée du densimètre en centimètre.

Elle est donnée par :

$$H_R = 22.2 - 100 * 3.8(R_1 - R_2) - H_c \quad (3.7)$$

Avec :

H_c : est le déplacement de la suspension dû à l'introduction du densimètre. Elle est prise (par convention) égale à 0 pour les 3 premières lectures et égale à 1,4 cm pour la suite.

TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)

TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)

1. Introduction :

Les ingénieurs spécialisés en géotechnique compactent les sols afin d'améliorer certaines de leurs propriétés, telles que la résistance au cisaillement, la compressibilité et la conductivité hydraulique vont varier en fonction des méthodes utilisées pour compacter le sol. Les sols compactés sont couramment utilisés dans des projets d'ingénierie géotechnique, tels que les barrages en terre, les couches de chaussée, les remblais, etc. Afin de prédire la performance des sols compactés, et d'élaborer des critères de construction adaptés, des essais de laboratoire conformes à des méthodes normalisées doivent être réalisés. Proctor (1933) a développé une procédure de test de compactage en laboratoire pour déterminer la teneur en eau permettant d'atteindre le poids volumique sec maximal en fonction d'une énergie pour répondre aux exigences du projet.

Le compactage est une opération qui dépend de quatre principales variables :

- La masse volumique du sol sec.
- La teneur en eau.
- L'énergie de compactage.
- Le type du sol.

2. Principe de l'essai :

L'essai est réalisé conformément à la norme NF P 94-093 : 1999, visant à évaluer les propriétés de compactage d'un matériau par le biais de plusieurs étapes. Il consiste à ajuster la teneur en eau du matériau et à le compacter selon des paramètres conventionnels spécifiés. Pour chaque niveau de teneur en eau considéré, la masse volumique sèche du matériau est mesurée, et ces données sont utilisées pour générer une courbe, appelée courbe Proctor. Cette courbe met en évidence une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec (ρ_{dmax}), obtenue à une teneur en eau spécifique appelée teneur en eau optimale (ω_{opt}). Ces deux paramètres, désignés comme les caractéristiques optimales de compactage, varient selon que l'essai réalisé suit la méthode Proctor normal ou modifié.

3. Equipements et matériaux :

Pour réaliser cet essai, le matériel suivant est nécessaire :

- Une quantité suffisante du sol sec (doit être séchée dans l'étuve avant la réalisation de l'essai).
- Un socle de compactage.
- Un moule Proctor.
- Une dame dite « dame Proctor normal » est constituée d'un mouton cylindrique de 51 ± 1 mm de diamètre.
- Une règle à araser.
- Un pulvérisateur à eau.
- Une étuve.
- Une balance.



Figure 4 Moule et dame de l'essai Proctor normal

4. Procédure de l'essai :

L'essai de compactage Proctor est exécuté en respectant les étapes suivantes :

1. Peser 3 kg du sol sec.

TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)

2. Humidifier le sol à une teneur en eau (ω) connue.
3. Diviser la quantité du sol homogénéisé en trois parties égales.
4. Peser le moule vide sans la hausse, et mesurer sa hauteur et son diamètre.
5. Solidariser : moule, embase et rehausse.
6. Introduire la 1ère partie du matériau et compacter 25 coups : trois séquences de huit coups répartis, et le 25ième au centre.
7. Refaire la même opération pour les trois couches.
8. Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, puis araser le matériau soigneusement.
9. Peser l'ensemble du moule avec le matériau.
10. Prélever une masse de l'échantillon à la surface du moule, puis retirer l'embase de ce dernier afin de prendre une 2ème masse, afin de mesurer les teneurs en eau correspondantes.
11. Rajouter 2 % de teneur en eau et bien mélanger avec le sol.
12. Recommencer l'opération de l'étape 5 à 10, plusieurs fois de suite avec des teneurs en eau croissantes afin de tracer une courbe de forme d'une cloche.

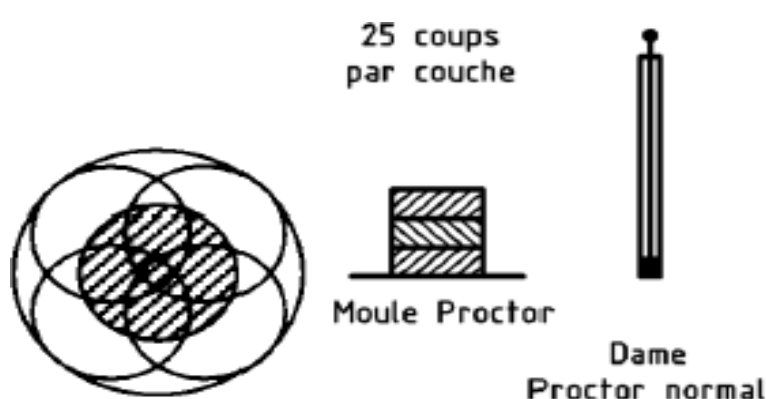


Figure 5 Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche dans un moule Proctor normal

TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)



Enlever la rehausse

Arasé le matériau

Figure 6 Echantillon du sol à la fin de compactage

5. Expression des résultats :

5.1. Calculs préparatoires :

Il est nécessaire de calculer, pour chaque échantillon compacté :

- La teneur en eau mesurée ($\omega_{mesurée}$).
- La masse volumique du matériau sec (ρ_d) en tenant compte du volume réel du moule utilisé, en utilisant la formule suivante :

$$\rho_d(kg/m^3) = \frac{\rho_h}{1 + \omega_{mesurée}} \quad (4.1)$$

Avec :

ρ_h : est la masse volumique du sol humide.

$$\rho_h(kg/m^3) = \frac{m_h}{V} \quad (4.2)$$

m_h : est la masse du sol humide (kg).

V : est le volume total du sol (m^3).

5.2. Tracé du graphe :

Dans le but de déterminer le poids volumique sec maximal et la teneur en eau optimale, on trace la courbe $\rho_d = f(\omega)$, puis on détermine ces deux paramètres à partir du graphe comme le montre la courbe Proctor ci-dessous.

TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)

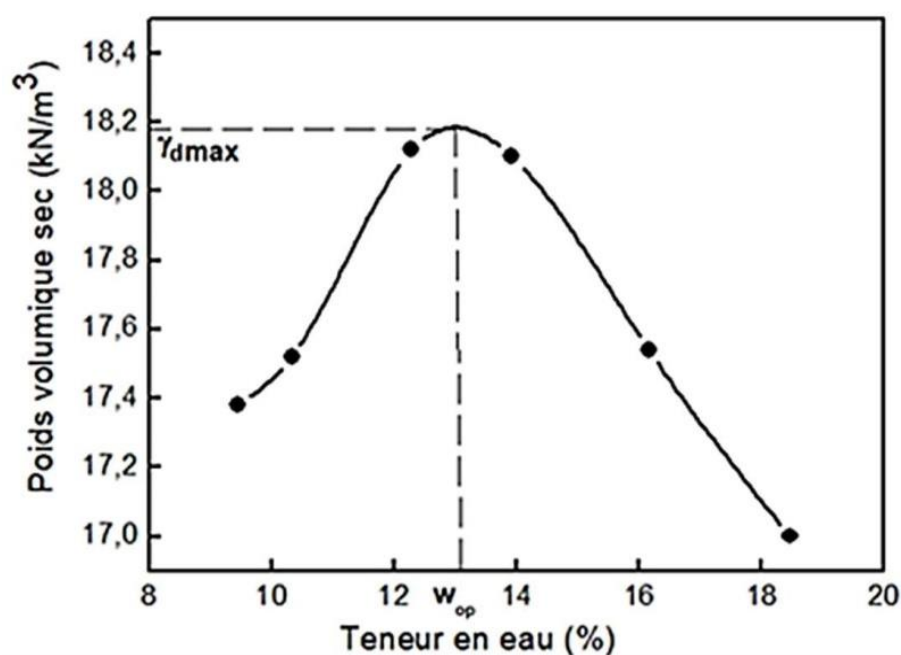


Figure 7 Courbe de compactage essai Proctor normal ($\rho_d=f(w)$)

Afin d'effectuer un essai de compactage Proctor, normal ou modifié, au laboratoire, il faut se référer au tableau 2. Ce tableau indique le nombre de couches et le nombre de coups par couche pour les quatre types d'essais normalisés (Proctor normal, Proctor modifié, Essai de compactage avec moule CBR normal, Essai de compactage avec moule CBR modifié).

Tableau 3 Caractéristiques techniques du matériau utilisé pour un essai Proctor

Caractéristiques	Moule Proctor		Moule CBR	
Volume du moule (cm ³)	948,55		2316,66	
Essai	Normal	Modifié	Normal	Modifié
Poids de la dame (kg)	2,49	4,54	2,49	4,54
Hauteur de la chute (cm)	30,5	45,7	30,5	45,7
Nb de coups /couche	25	25	55	55
Nombre de couches	3	5	3	5
Energie (KJ/dm ³)	0,59	2,68	0,53	2,41

6. Exemple de calcul :

Un essai de compactage Proctor normal a été réalisé sur un échantillon du sol et a donné les résultats suivants :

TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)

Tableau 4 Les résultats obtenus lors de l'essai Proctor normal

Masse d'eau ajoutée à chaque étape de compactage (%)	8	10	12	14	16
Masse totale humide (m1) (kg)	5,265	5,353	5,405	5,39	5,387
Masse du moule (m2) (kg)	3,313	3,313	3,313	3,313	3,313
Volume du moule (cm ³)	937,76	937,76	937,76	937,76	937,76

Les valeurs de la teneur en eau mesurée pendant l'essai sont :

Tableau 5 Résultats de la mesure de la teneur en eau lors de l'essai de Proctor normal

N° de la tare	1(H)	2(B)	4(H)	5(B)	20,39	8(B)	10(H)	11(B)	13(H)	14(B)
Masse totale humide (g)	29,85	31,01	32,72	39,14	43,92	45,21	44,17	46,25	40,21	43,25
Masse totale sèche (g)	28,41	29,43	30,7	36,48	40,33	41,58	39,77	41,72	35,68	38,49
Masse de la tare (g)	10,98	10,62	10,9	10,86	10,84	10,76	10,93	10,54	7,75	7,68

Le calcul suivant est effectué pour tous les points de l'essai de compactage réalisé au laboratoire :

a. Calcul des paramètres de compactage :

Le premier point de la masse d'eau ajoutée au sol pour réaliser le 1er essai de compactage de 8% :

1. Masse du sol humide (kg) = Masse totale humide - Masse du moule = m1 - m2
2. Volume du moule : V = 937,76 cm³.
3. La teneur en eau mesurée pendant l'essai est la moyenne des deux mesures réalisées pour les tares (H) et (B) : $\omega = 8,33 \%$.

- La teneur en eau pour la tare (H) est calculée comme suit :

$$\omega = \frac{29,85 - 28,41}{28,41 - 10,98} * 100 = 8,26 \%$$

TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)

4. Masse du sol sec

$$\text{Masse du sol sec} = \frac{\text{Masse du sol humide}}{1+\omega} = \frac{m_1 - m_2}{1+\omega} = \frac{5,265 - 3,313}{1+8,26} = 1,80 \text{ Kg}$$

- Masse volumique sèche est donnée par la formule suivante :

$$\rho_d = \frac{\text{Masse du sol sec (ms)}}{\text{Volume total (V)}} = \frac{1,80}{937 \times 10^{-6}} = 1925,62 \text{ Kg/m}^3$$

Tableau 6 Résultats de l'essai de compactage Proctor normal

Masse d'eau ajoutée à chaque compactage (%)	8		10		12		14		16	
Masse totale humide (m1) (kg)	5,265		5,353		5,405		5,39		5,387	
Masse du moule (m2) (kg)	3,313		3,313		3,313		3,313		3,313	
Masse du sol humide (kg)	1,952		2,04		2,092		2,077		2,074	
Volume du moule (cm ³)	937,76		937,76		937,76		937,76		937,76	
Masse humide mT (N)	19,52		20,4		20,92		20,77		20,74	
Densité humide (Gh)	2,08		2,18		2,23		2,21		2,21	
N° de la tare	1(H)	2(B)	4(H)	5(B)	20,39	8(B)	10(H)	11(B)	13(H)	14(B)
Masse total humide (g)	29,85	31,01	32,72	39,14	43,92	45,21	44,17	46,25	40,21	43,25
Masse totale sèche (g)	28,41	29,43	30,7	36,48	40,33	41,58	39,77	41,72	35,68	38,49
Masse de la tare (g)	10,98	10,62	10,9	10,86	10,84	10,76	10,93	10,54	7,75	7,68
Masse de l'eau (g)	1,44	1,58	2,02	2,66	3,59	3,63	4,4	4,53	4,53	4,76
Masse du sol sec (g)	17,43	18,81	19,8	25,62	29,49	30,82	28,84	31,18	27,93	30,81
Teneur en eau (%)	8,26	8,40	10,20	10,38	12,17	11,78	15,26	14,53	16,22	15,45
Teneur en eau moyennes (%)	8,33		10,29		11,97		14,9		15,8	
Masse du sol sec (Kg)	1,80		1,85		1,87		1,81		1,79	
Masse volumique sèche (ρ_d (Kg/m³))	1925,62		1972,78		1994,11		1930,13		1908,80	
Densité sèche (Gd)	1,92		1,97		1,99		1,93		1,90	

b. Tracé du graphe :

Les résultats mesurés et calculés (tableau 4.4) permettent de tracer le graphe $\rho_d = f(\omega)$.

TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)

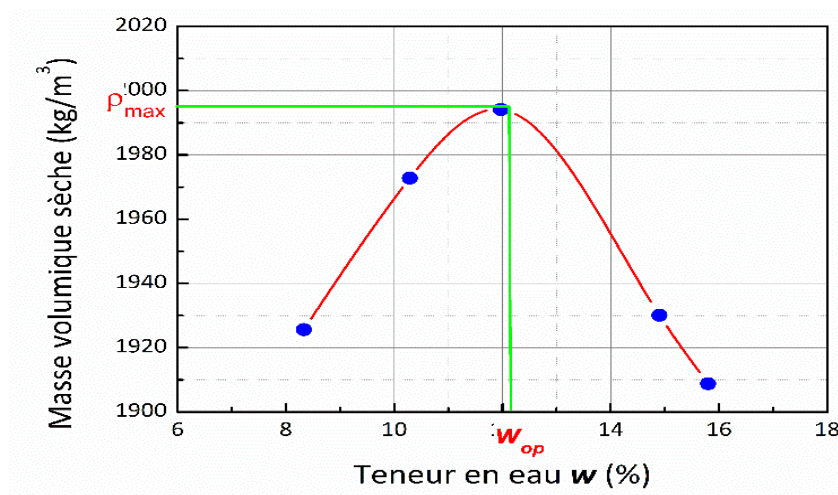


Figure 8 Courbe de compactage de Proctor normal

A partir du graphe tracé on lit les paramètres de l'optimum suivants :

$$\rho_{dmax} = 1995.15 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \text{ et } \omega_{opt} = 12.5 \%$$

7. Conclusion :

L'essai de compactage vise à déterminer la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale pour une énergie donnée. Ces deux paramètres présentent une utilité potentielle sur le terrain. Cependant, il est important de noter que la reproduction exacte du compactage effectué sur le chantier n'est pas réalisable en laboratoire en raison des différences de modes de chargement entre les engins de chantier et les conditions sur site. Malgré cette limitation, les valeurs mesurées de ces deux paramètres en laboratoire sont néanmoins précieuses pour réussir le compactage in-situ et assurer une vérification efficace du travail réalisé.

Le diagramme obtenu de l'essai de compactage, illustrant la densité sèche en fonction de la teneur en eau, revêt une importance cruciale dans la gestion d'un chantier de compactage. Une fois qu'il est établi qu'une corrélation peut être établie entre le processus utilisé en laboratoire et le nombre de passages des divers engins, tout en respectant les exigences définies, les objectifs du chantier seront accomplis.

TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)

En outre, il convient de souligner que la plupart des spécifications liées aux travaux de terrassement requièrent l'atteinte d'un poids volumique sec minimal sur le chantier, correspondant à 95 % du poids volumique sec maximum obtenu en laboratoire.

TP 5 : Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane

1. Introduction :

Lorsque du sol est utilisé dans la construction de plates-formes d'autoroute, de couches de chaussée, de centres de stockage des déchets, de barrages en terre, de remblais, etc., il est impératif de le compacter selon les normes du projet. Les spécifications relatives à la compaction du sol sont généralement définies en termes de plage acceptable de teneur en eau (ω) et/ou de poids volumique sec (γ_d), en se basant sur les résultats des essais de compactage en laboratoire. Afin de vérifier la conformité du sol aux spécifications du projet, le poids volumique sec (et la teneur en eau) du sol compacté in situ est mesuré pour confirmer qu'il répond aux exigences du cahier des charges. Parmi les diverses méthodes et dispositifs disponibles, le densitomètre à membrane est utilisé pour mesurer in situ le poids volumique sec (γ_d) et la teneur en eau (ω).

2. Principe de l'essai :

L'objectif de cet essai est de calculer la masse volumique d'un matériau en place, avec une focalisation particulière sur les matériaux dont le diamètre maximal (D_{max}) est inférieur à 50 mm. La procédure est conforme à la norme NF P 94-061-2 : 1996. Elle consiste à creuser une cavité dans le sol, la collecte et la pesée de la totalité du matériau extrait, suivies de la mesure du volume de la cavité à l'aide d'un densitomètre à membrane rempli d'eau.

3. Equipements et matériaux :

Le matériel suivant est nécessaire pour effectuer cet essai :

- Un densitomètre à membrane.
- Quatre piquets d'ancrage (valets).
- Matériel pour le creusement (pelle, marteau, etc.).
- Matériel de prélèvement (sacs en plastique, bacs, etc.).
- Balance.
- Etuve.

TP 5 : Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane

- Récipients pour mesurer la teneur en eau.

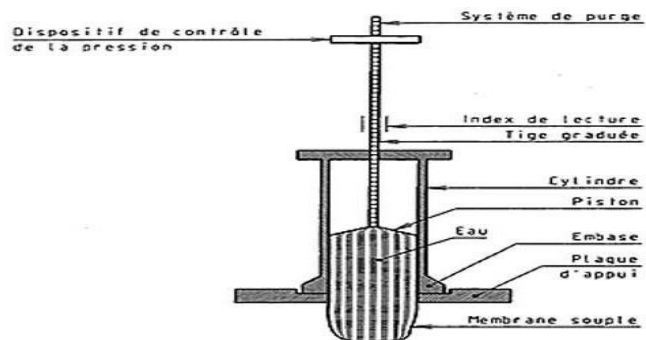


Figure 9 Densitomètre à membrane

4. Procédure de l'essai :

1. Vérifier l'étanchéité de la membrane et remplir le densitomètre d'eau.
2. Fixer la plaque d'appui sur une surface plane sensiblement horizontale en utilisant les valets de fixation.
3. Solidariser l'appareil avec la plaque d'appui.
4. Appuyer sur le piston jusqu'à obtenir la pression désirée.
5. Déterminer le volume initial (V_i) affiché sur le système de lecture.
6. Excaver un trou du sol à travers l'orifice de la plaque.
7. Recueillir tout le matériau extrait, le mettre dans sac hermétique.
8. Peser le matériau humide (m_h).
9. Introduire le matériau humide dans l'étude, après 24 heures déterminer sa masse sèche (m_s).
10. Mesurer sa teneur en eau du matériau humide extrait (ω).
11. Fixer à nouveau le densitomètre sur la plaque d'appui.
12. Actionner sur le piston jusqu'à la pression désirée afin de remplir la membrane.
13. Mesurer le Volume final (V_f) lu sur le système de lecture.

TP 5 : Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane

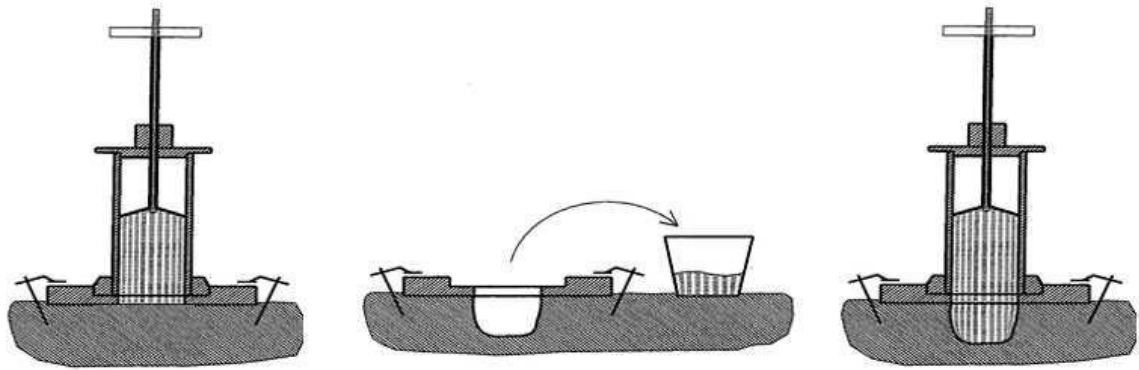


Figure 10 Procédure de l'essai de densitomètre à membrane

5. Expression des résultats :

- La masse volumique du sol humide est exprimée par la formule suivante :

$$\rho_h = \frac{m_h}{V_f - V_i} (kg/m^3) \quad (5.1)$$

- La teneur en eau, elle est calculée comme suit :

$$\omega = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad (5.2)$$

- La masse volumique du sol sec est déterminée par la formule suivante :

$$\rho_d = \frac{\rho_h}{\omega + 1} (Kg/m^3) \quad (5.3)$$

6. Exemple de calcul :

Un essai au densitomètre à membrane a été réalisé lors du compactage d'un remblai routier. Les données sont les suivantes :

Volume initial V_i	260 cm ³
Masse du matériau humide extrait du trou (m_h)	1157,58 g
Volume final V_f après prélèvement du matériau	850 cm ³
Masse du matériau sec (m_s)	1062 g

TP 5 : Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane

- **Calculer la densité sèche du sol mesuré in situ.**

Pour déterminer la densité sèche, on procède les étapes du calcul suivantes :

a. *Calcul de la teneur en eau (ω)*

$$\omega = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 = \frac{1157.58 - 1062}{1062} \times 100 = 9\%$$

b. *Calcul de la masse volumique humide (ρ_h)*

$$\rho_h = \frac{m_h}{V_f - V_i} = \frac{1157.58}{850 - 260} = 1,962(g/cm^3) = 1962(kg/m^3)$$

c. *Calcul de la masse volumique humide (ρ_d)*

$$\rho_d = \frac{\rho_h}{\omega + 1} = \frac{1962}{0.09 + 1} = 1800(Kg/m^3)$$

a. *Calcul de la densité (G_d)*

$$G_d = \frac{\rho_d}{\rho_w} = \frac{1800}{1000} = 1.8$$

7. Conclusion :

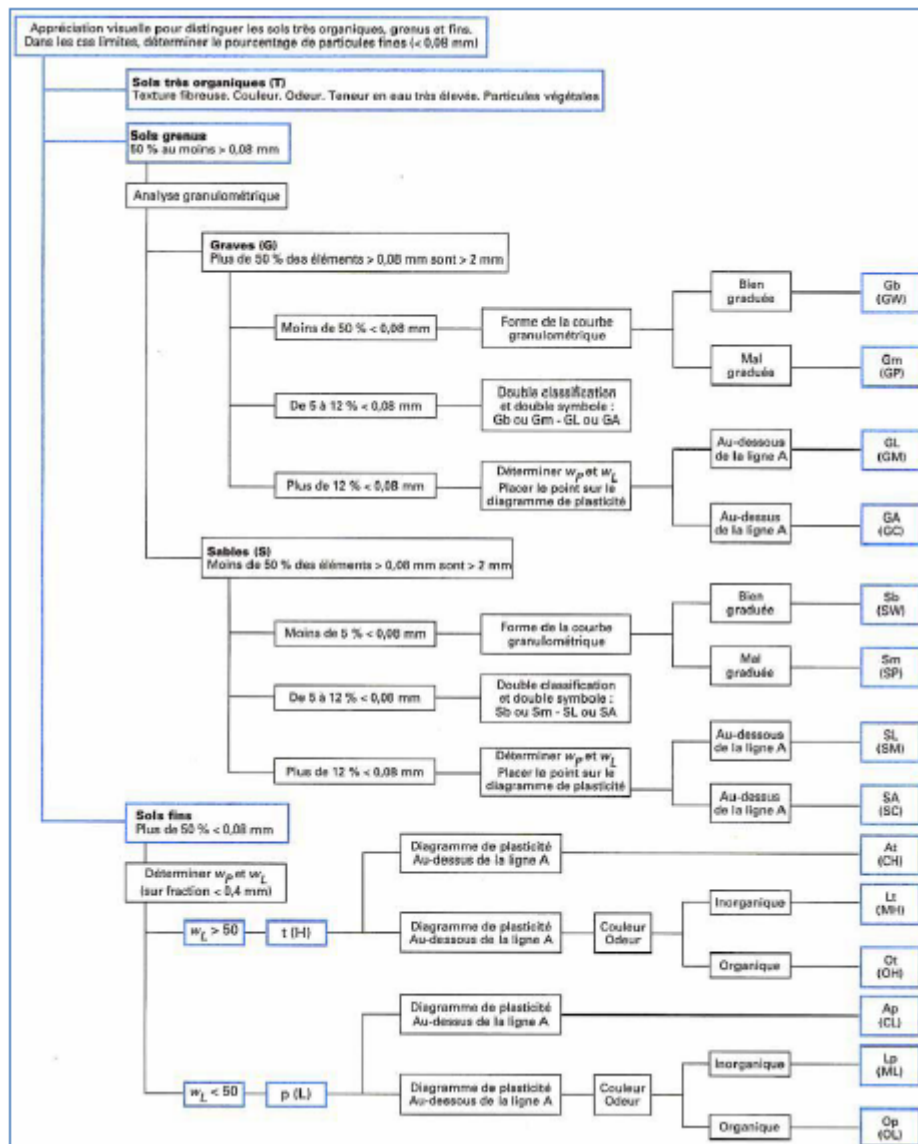
Ce chapitre a été dédié à la détermination de la masse volumique des sols in situ à l'aide de l'essai au densitomètre à membrane. Il s'agit d'une méthode simple et rapide, particulièrement adaptée à une application sur de vastes terrains en raison de son processus de calcul simplifié.

Cependant, au cours de l'expérimentation, une vigilance particulière est essentielle pour prévenir tout dommage à la membrane de l'appareil de mesure, en particulier lorsqu'il s'agit de matériaux granulaires ou graveleux. En plus, lors de l'essai c'est parfois difficile d'obtenir une forme de trou qui permettrait à la membrane de bien épouser sa forme.

Références

- 1) Amar S., Magnan J.-P. (1980). « Essais de mécanique des sols en laboratoire et en place : Aide-mémoire ». Rapport des LPC, France, 1980.
- 2) Costet J., Sanglerat G.. (1981) « Cours pratique de mécanique des sols ». Dunod.
- 3) Ghomari F. et Bendi-Ouis A., 2008 « Travaux pratiques de matériaux de Construction. <http://fsi.univ-tlemcen.dz/cours-GHOMARI2.html>.
- 4) GTR. (2000). « Guide Technique pour la Réalisation des Remblais et des Couches de Forme ». Fascicules 1, principes généraux, 100p, LCPC-SETRA.
- 5) Hachichi A., Benaissa A. (1984) « Travaux pratiques de mécanique des sols » photocopié U.S.T.O.
- 6) Lérau J, (2006), « Cours Géotechnique 1 » Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- 7) Schlosser F. « Eléments de mécanique des sols ». Presse des Ponts, France, 1988.

Annexe1 – Classification LPC/USCS des sols en laboratoire





Annexe 2 – Classification des sols LPC modifiée (1974/1980)

