

TP 1 : Analyse granulométrique du sol:

1. But de l'essai :

L'analyse granulométrique par voie sèche correspond à la détermination de la granularité c'est-à-dire la détermination de la distribution dimensionnelle des grains (exprimée en pourcentage de masse) qui constituent l'échantillon.

2. Principe de l'essai :

L'essai consiste en fait à classer les différents grains constituant l'échantillon par une série de tamis emboîtés les uns dans les autres. Les ouvertures de ces tamis sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau est placé en partie supérieure et le classement est obtenu alors par vibration manuelle de la colonne de tamis.



3. Equipement nécessaire :

L'équipement nécessaire pour effectuer une opération de tamisage est des tamis constitués d'un maillage métallique définissant des trous carrés de dimensions normalisés.

Les cotés des mailles sont échelonnés de 0,08mm à 80mm selon une série géométrique de raison : $\sqrt{10}$

On désigne les tamis l'ouverture du coté c en mm, cependant pour plus de commodité, on utilise la notion de module.

Le module de tamis est un entier naturel définit par :

$$\text{Module (du tamis)} = n = 10 \log (\text{ouverture du tamis en } \mu) + 1$$

La série d tamis est représentée dans le tableau suivant :

Module	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tamis (mm)	0.08	0.100	0.125	0.160	0.200	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630	0.800
Module	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
Tamis (mm)	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30	8.00	10
Module	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
Tamis (mm)	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80		

4. Conduite de l'essai :

Cet essai s'applique à un échantillon de granulats ne contenant pas une fraction argileuse significative. Ceci conduit à prendre impérativement certaines précautions pour ne pas perdre les éléments fins qui se trouvent dans l'échantillon.

- **En ce concerne la préparation de l'échantillon :**

La quantité de l'échantillon doit être assez grande pour que l'échantillon soit représentatif.

L'échantillon ne doit pas dépasser une certaine quantité pour que l'essai ne dure pas trop longtemps et pour ne pas saturer les tamis.

En général, on prend un échantillon de masse $M=0,2D$ avec :

M : masse de l'échantillon en Kg.

D : diamètre du plus gros granulat en mm.

- **Description de l'essai :**

Après avoir séché l'échantillon à l'étuve à une température de l'ordre de 105°C et emboîté les tamis sur un fond plein dans un ordre décroissant du haut vers le bas, on verse le matériau dans la partie supérieure de la colonne de tamis et on ferme l'ensemble avec un couvercle pour éviter toute perte durant le tamisage qu'on effectue manuellement.

Remarque :

Le temps de tamisage varie selon le matériel utilisé et dépend aussi de l'échantillon. En général, on considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de vibrations de l'ordre d'une minute.

On appelle refus le poids du matériau retenu par un tamis.

On appelle tamisât le poids du matériau passant par ce même tamis.

On pèse le refus de chaque tamis y compris le tamisât contenu dans le fond plein.

En principe la somme des refus cumulés doit être égale au poids de l'échantillon introduit en tête de colonne. Les pertes durant l'essai ne doivent pas dépasser 2% du poids total de l'échantillon.

5. Expression des résultats :

On présente les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des tamisâts cumulés sous la forme d'une courbe appelée courbe granulométrique dans laquelle les ouvertures des tamis sont portées en abscisse, sur une échelle logarithmique et les pourcentages en ordonnée sur une échelle arithmétique.

La courbe est alors tracée de manière continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points.

5.1. Mesures :

- Pour le sable:

La masse totale $M=593.31g$.

D (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
>2,50	84,11	84,11	14,2	85,5
>2,00	38,57	122,68	20,7	79
>1,60	81,09	203,77	34,4	65,3
>0,80	160,25	364,02	61,5	38,2
>0,16	204,17	568,19	95,9	3,8
Fond	23,74	591,93	99,7	0

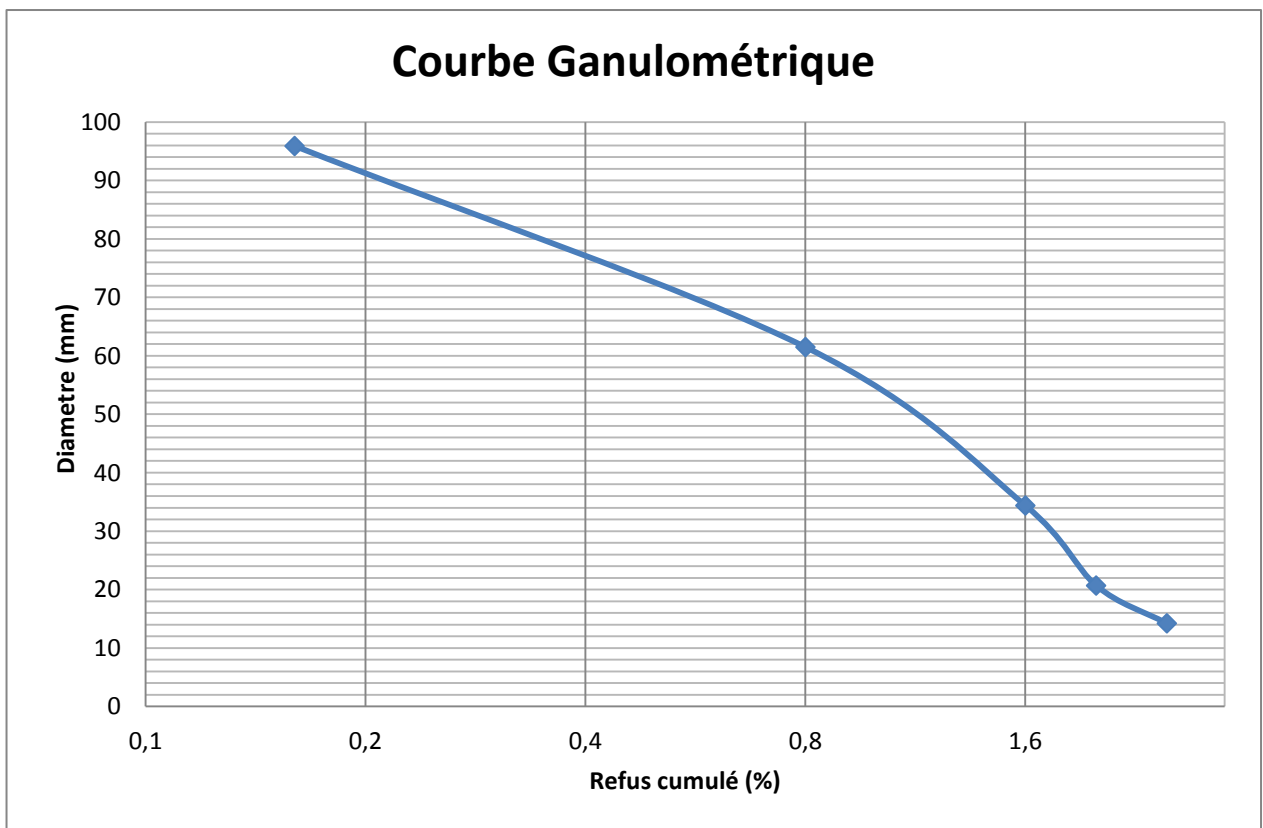
$$\text{Perte} = (593,31 - 591,93) / 593,31 = 0,23\% < 2\%$$

5.2. courbe granulométrique :

courbe granulométrique qui donne la répartition de la dimension moyenne des grains, exprimée sous forme de pourcentage du poids total du matériau.

Elle est tracée en diagramme semi-logarithmique avec :

- en abscisse, le logarithme de la dimension des ouvertures des tamis en valeurs croissantes ;
- en ordonnée, le pourcentage, en poids du matériau total, de la fraction du sol dont les grains ont un diamètre moyen inférieur à celui de l'abscisse correspondante (passant).



On détermine en particulier

- la dimension des plus gros éléments d_{max} ;
- le pourcentage de tamisat à 2mm, à $80\mu m$;
- les dimensions d_N pour N fixé (N en pour cent désigne la dimension des grains dont le pourcentage N est de dimension inférieure ou égale à d) ;
- le facteur d'uniformité de Hazen $CU = d_{60}/d_{10}$, pour $CU < 2$ la granulométrie est dite uniforme ou serré , pour la granulométrie $CU > 2$ la granulométrie est dite étalé ;
- le facteur de courbure : $CC = (d_{30})^2 / (d_{10} \cdot d_{60})$;
- d_{10} : diamètre efficace.

TP 2: MESURE DE LA DENSITE EN PLACE (Avec le densitomètre au cône de sable) :

1. BUT :

Ce TP a pour but de déterminer par un procédé rapide, la densité du sol en place. Nous allons pour cela utiliser le densitomètre au cône de sable.

2. PRINCIPE :

Il est basé sur la mesure de la masse, de la teneur en eau et du volume d'un échantillon prélevé d'un trou de quelques litres de capacité. La densité en place est obtenue par simple division.

3. MANIPULATION :

NB : La manipulation était prévue pour être faite avec le densitomètre à membrane, mais ce dernier étant en panne, nous avons utilisé le densitomètre au cône de sable.

- Trois échantillons de sable sont préparés, pesés et conduits sur le site sur lequel seront creusés les différents trous.
- Les trois trous de quelques litres de capacité sont creusés, des échantillons de sol y sont prélevés.
- Les trous sont remplis par le sable jusqu'à leur niveau supérieur (niveau du sol).
- Un échantillon de sol prélevé sur site est passé à l'étuve pour une durée de 24 heures.
- En fin de séjour à l'étuve, le sol est repesé pour obtenir sa masse sèche.
- Les différents résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

	Sol 1	Sol 2	Sol 3
Masse de la tasse (g)	17.14	17.36	17.33
Masse du sol humide introduit à l'étuve (g)	83.81	79.52	77.97
Masse du sol sec sorti de l'étuve (g)	78.64	76.17	73.34
Masse du sable introduit dans le trou	627.06	636.92	654.74

(g)			
Masse humide du sol prélevé sur site	695.56	697.56	764.85

- Pour déterminer le volume de l'échantillon du sol, on a déterminé la densité du sable. Pour cela, on a mesuré le poids d'un échantillon de sable de volume 500 ml. On a obtenu $m = 741.39\text{g}$, ce qui donne

$$\gamma_{d.sable} = 1.482$$

On déduit le volume du sol prélevé par division de la masse de ce dernier par γ_{dsable}

4. EXPLOITATION DES RESULTATS :

Soit V le volume du trou, W_h la masse du sol humide, ω , la teneur en eau.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} = \frac{W_s}{\left(\frac{W_t}{\gamma_t}\right)} = \gamma_t * \left(\frac{W_s}{W_\omega + W_s}\right) = \gamma_t * \frac{1}{1 + \omega}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1 + \omega} = \left(\frac{W_h}{V}\right) * \left(\frac{1}{1 + \omega}\right)$$

On obtient pour les différents échantillons, les valeurs suivantes

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
W_h (g)	695.56	697.56	764.85
V (cm ³)	423.12	429.77	441.79
ω (%)	6.57	4.39	6.31
γ_d	1.542	1.554	1.628
γ_{dh}	1.482	1.482	1.482

La densité moyenne serait alors :

$$\overline{\gamma_d} = \frac{\gamma_{d1} + \gamma_{d2} + \gamma_{d3}}{3} = 1.574$$

$\gamma_d = 1.574$

5. CONCLUSION :

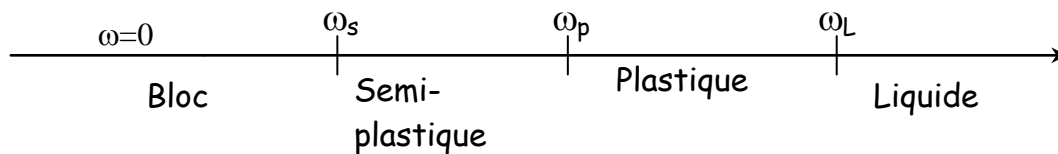
- Il est à remarquer que le densitomètre au cône de sable devrait être moins précis que le densitomètre à membrane car contrairement à ce dernier, il n'y a pas une manière normalisée de remplir de sable, le trou creusé.

- Il y a des pertes qui introduisent des erreurs de manipulation.

TP 3: Limites d'ATTERBERG:

Introduction

Les limites d'Atterberg sont classées parmi les caractéristiques d'identification des sols fins. En effet, la consistance d'un sol et sa déformation varie en fonction de sa teneur en eau, plus ω augmente plus le sol est déformable. Aussi, suivant l'importance de la phase liquide du sol cohérent, il peut se présenter sous différentes états, ainsi on distingue les quatre états suivants :



1. BUT :

Le but de ce TP est de déterminer les limites de liquidité ω_L et de plasticité ω_p pour un échantillon de sol donné, et d'interpréter les résultats obtenus.

2. Principe et manipulation :

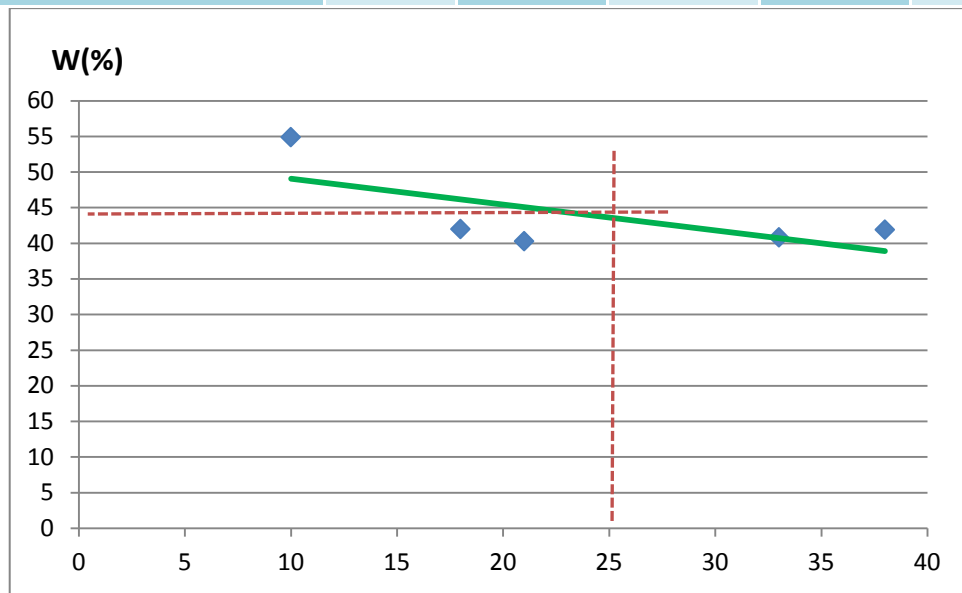
1. limite de liquidité :

On réalise simultanément l'essai utilisant l'appareil de Casagrande et celui de pénétration qui s'effectue par l'aiguille de Vicat.

- Quelques grammes de la pâte du sol déjà préparé sont placés dans la coupelle.
- On nivelle la surface à une épaisseur d'environ 1cm.
- On trace une rainure suivant le plan axial de la coupelle à l'aide de l'outil spécial.
- La manivelle est tournée de 2 tours par seconde environ jusqu'à ce que les deux lèvres de la rainure se rejoignent sur 1 cm.
- On note le nombre de chocs.
- On prélève un échantillon d'environ 10g à l'endroit où les deux lèvres sont jointes, on le pèse immédiatement et on l'introduit dans l'étuve.
- Du même échantillon, dans la coupelle, on remplit et on arase le petit moule de l'appareil de Vicat puis on lit la pénétration en (mm) de l'aiguille dans l'échantillon.
- La coupelle est vidée sur le reste de l'échantillon et malaxée
- On reprend l'essai 5 fois

Les différents résultats obtenus sont récapitulés sur le tableau suivant :

<u>Essai</u>	1	2	3	4	5
Nombre de coups	6	10	18	21	33
Poids de la tare (g)	7,04	13,60	12,14	12,64	12,38
Poids du sol humide et la tare (g)	13,69	20,37	19,94	20,35	19,17
Poids du sol sec et de la tare (g)	11,56	17,97	17,60	18,13	17,20
Poids de l'eau (g)	2,13	2,4	2,34	2,22	1,97
Poids du sol sec (g)	4,52	4,37	5,56	5,5	4,82
ω (%)	47,1	54,9	42	40,3	40,8



Courbe $\omega = f(N)$

D'après la courbe $\omega = f(N)$ on déduit la valeur de ω_L qui correspond à 25 coups.

$\omega_L = 44 \%$

2. limite de Plasticité :

- La pâte utilisée pour la détermination de ω_L est légèrement séchée ; on forme une boulette que l'on roule entre les mains afin d'obtenir un rouleau que l'on amincit pour avoir un faisceau de 3mm de diamètre et de 5 à 6 cm de longueur environ.
- La limite de plasticité est atteinte lorsque le rouleau se brise en petit morceau de 1 à 2 cm de longueur au moment où son diamètre atteint 3 mm.
- Si le rouleau se casse avant d'atteindre 3 mm, on humidifie légèrement et on malaxe de nouveau l'échantillon. Si le rouleau se casse après 3 mm de diamètre, on sèche légèrement et on malaxe de nouveau l'échantillon.
- On pèse les morceaux obtenus et on les introduit à l'étuve pour une nouvelle pesée le lendemain.

Les différentes valeurs obtenues sont récapitulées dans le tableau suivant :

Poids de la tare (g)	7.46
Poids du sol humide, y compris la tare (g)	9.08
Poids du sol sec, y compris la tare (g)	7.46
Poids de l'eau (g)	1.62
ω (%)	17.9

$$\omega_P = 17.9 \%$$

3. Exploitation des résultats :

Nous pouvons ainsi déduire l'indice de plasticité :

$$I_p = \omega_L - \omega_p$$

$$I_p = 26.1 \%$$

4. CONCLUSION

Le présent TP nous a permis de comprendre qu'à partir des simples essais au laboratoire qui sont moins coûteux, on peut déduire des résultats importants sur le gonflement du sol et sa structure minéralogique.

TP 4: ESSAI PROCTOR NORMAL :

1. BUT :

Le but du compactage est d'obtenir un sol suffisamment compact et dense dans l'objectif de :

- Réduire ses tassements et augmenter sa portance
- Accroître sa résistance aux cisaillements
- Améliorer son comportement sous l'action de l'eau

Au cours de ce TP, nous essayerons de déterminer la teneur en eau optimale (ω_{opt}) pour laquelle la densité est maximale.

2. PRINCIPE :

Le sol est compacté à différents teneurs en eau, dans un moule standard. La hauteur de chute de la dame est normalisée.

3. RAPPELS THEORIQUES :

Proposons-nous de démontrer la formule donnant le poids de l'eau W_{eau} à ajouter à l'échantillon afin d'obtenir la teneur en eau ω_d désirée.

4. NOTATION :

Appelons :

W_T : Poids total de l'échantillon du sol

ω_D : Teneur en eau désirée

ω_0 : Teneur en eau initiale

W_{eau} : Poids d'eau à ajouter à l'échantillon à l'échantillon pour avoir la teneur en eau désirée ω_d

W_0 : Poids de l'eau lorsque la teneur en eau est ω_0

W_S : Poids du solide

$$\begin{aligned}\omega_D - \omega_0 &= \frac{W_{Eau}}{W_S} = \frac{W_{Eau}}{W_T} * \frac{W_T}{W_S} \\ &= \frac{W_{Eau}}{W_T} * \frac{W_S + W_0}{W_S}\end{aligned}$$

$$= \frac{W_{Eau}}{W_T} * \frac{W_s \left(1 + \frac{W_0}{W_s} \right)}{W_s}$$

$$= \frac{W_{Eau}}{W_T} * (1 + \omega_0)$$

Ainsi,

$$W_{Eau} = \frac{W_T (\omega_D - \omega_0)}{1 + \omega_0}$$

5. MANIPULATION :

- ✓ On dispose d'un échantillon de masse **m = 4kg** et dont la teneur en eau initiale est supposée égale à 2%
- ✓ On mesure le poids du moule à vide. On trouve **m₀ = 4987.5 g**
- ✓ Suivant la formule (1) ci dessus démontrés, on détermine les différentes quantités d'eau à ajouter pour obtenir la teneur en eau désirée. On a respectivement considéré les teneurs en eau suivantes : 10%, 12% ; 14%, 16% ; 18% et 20%.
- ✓ A chaque étape, on procède comme suit :
 - On remanie le sol jusqu'à ce que la teneur en eau soit supposée uniforme
 - Une première fraction est introduite dans le moule et celle-ci est compactée à l'aide de 25 coups de la dame
 - On suit la même procédure pour une 2^{ème} puis une 3^{ème} fraction
 - On enlève la hausse amovible du moule
 - La couche supérieure débordant la partie inamovible du moule est rasée.
 - On pèse le moule et son contenu.
 - On prélève du centre de l'échantillon, une fraction d'environ 100g placée dans une tasse et introduite dans l'étuve. La tasse et la fraction du sol ont été préalablement pesées. Après 24h de séjour dans l'étuve, on pèse à nouveau la fraction de sol. Ces différentes valeurs sont récapitulées dans le tableau (Compaction test)

6. EXPLOITATION DES RESULTATS :

❖ CALCUL DE LA TENEUR DE L'EAU :

ESSAI n°	1	2	3	4	5	6
Tare n°	76	6	30	38	97	20
Teneur en eau proposée (%)	6	8	10	12	14	16
Quantité d'eau à ajouter (g)	235,29	78,43	78,43	78,43	78,43	78,43
Poids de la tare vide (g)	35,02	28,16	29,18	29,36	30,06	28,66
Poids de la tare + le sol humide (g)	154,78	152,98	213,66	125,77	136,73	187,42
Poids de la tare + le sol sec (g)	148,55	144,62	198,78	116,63	125,31	168,32
Poids du sol humide (g)	119,76	124,82	184,48	96,41	106,67	158,76
Poids du sol sec (g)	113,53	116,46	169,60	87,27	95,25	139,66
Poids de l'eau (g)	6,23	8,36	14,88	9,14	11,42	19,1
Teneur en eau(%)	5,49	7,18	8,77	10,47	11,99	13,68

❖ CALCUL DE LA DENSITE :

ESSAI N°	1	2	3	4	5	6
Poids moule+sol (g)	6707,5	6762,2	6851,9	6888,0	6902,8	6862,0
Poids moule à vide (g)	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Poids du sol humide (g)	1707,5	1762,2	1851,9	1888,0	1902,8	1862,0
Densité (δ) (g/cm ³)	1,81	1,87	1,96	2,0	2,02	1,96

❖ REMARQUE :

La densité est le rapport du poids de sol humide et du volume de moule qui est pris = 0.943 dm³

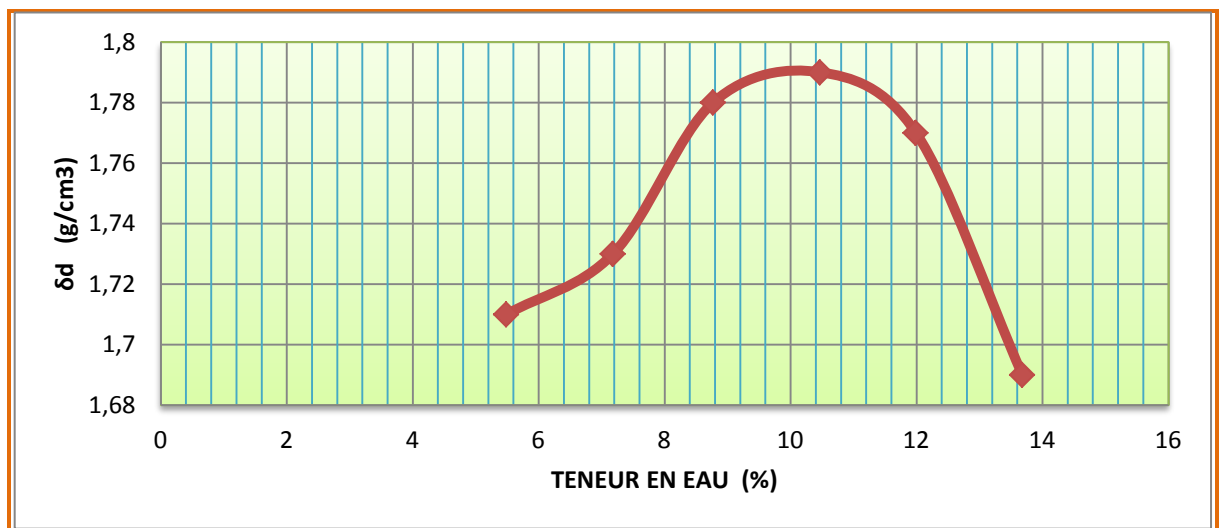
En appliquant la relation suivante :

$$\delta_d = \delta / (1+W)$$

On obtient :

ESSAI n°	1	2	3	4	5	6
La teneur en eau (%)	5,49	7,18	8,77	10,47	11,99	13,68
δ_d (g/cm ³)	1,71	1,73	1,78	1,79	1,77	1,69

❖ LA COURBE (δ_d) EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU) :



W_{opt} correspond au sommet de la parabole obtenue :

$$W_{OPT} = 10,2 \%$$

et δ_{dmax} correspond :

$$\delta_{dmax} = 1,79 \text{ g/cm}^3$$

7. INTERPRETATION DES RESULTATS :

- Lorsque ω croît, tout en étant inférieur à $\gamma_d = \omega_{opt}$, γ_d croît. L'eau ici joue alors le rôle de lubrifiant en diminuant les frottements entre les différents grains du sol, donc augmente ainsi la densification.
- A partir de ω_{opt} , γ_d décroît quand ω croît. Ceci s'explique par le fait que l'eau ayant pris la place de certains grains, absorbe une partie de l'énergie de compactage d'où la diminution de la densification.

- La courbe de saturation obtenue est au-dessus de la courbe de compactage. Ceci est dû au fait que dans la pratique, le volume d'air dans le sol ne peut jamais être complètement éliminé.

8. CRITIQUES :

Des erreurs ont été accumulées au cours de la manipulation, parmi lesquelles on cite :

- Erreurs dues au fait que nous ne disposions que d'un seul échantillon sur lequel toutes les mesures ont été effectuées, alors qu'en réalité, nous devrions utiliser 6 échantillons du même sol pour les différents points de la courbe.
- Erreurs dues aux pertes de sol au cours de l'opération de compactage des différentes couches.
- Erreurs dues au fait que pour chaque point de la courbe, une fraction d'environ 100g a été prélevée et placée dans l'étuve, alors que les calculs de détermination de la quantité d'eau à ajouter n'avaient pas tenu compte de ces prélèvements.

9. CONCLUSION :

Ce TP nous a permis de vérifier les connaissances théoriques acquises au cours, sur le compactage des sols, malgré les quelques erreurs qui se sont infiltrées au cours de la manipulation.

TP 5 : IDENTIFICATION ET CLASSIFICATION DES SOLS :

INTRODUCTION :

L'étude de la texture des sols et de distributions granulométriques est très indispensable, l'ingénieur en génie minéral est appelé à avoir une idée générale concernant la classification des sols. Tout cela est dans le but de les exploiter sans risques ou d'en tirer le profit maximum.

1. BUT:

Le but de ce TP consiste à identifier et classier les sols de manière qualitative tout en s'appuyant sur l'inspection visuelle d'une part et sur des tests simples d'autre part.

2. MANIPULATION :

Cette manipulation est basée sur l'identification d'une série d'échantillons inconnus selon un ensemble de critères à savoir :
La couleur, l'odeur, la structure et par des tests in situ; celui de la résistance « sèche », de la dilatance, test de plasticité.

Les observations sont données dans le tableau suivant:

IDENTIFICATION ET CLASSIFICATION DES SOLS :
(Classification visuelle)

Echantillon N		1	2	3	4	5
1. couleur		Beige	Varié	Rouge	Noir	Marron
2. odeur		Non organique	Non organique	Non organique	organique	organique
3. texture		Grains fins	Gros fins	Mélange de grain	Grains fins	Grains fins
4. S O L G R E N U	A- classe	Sable fin	Gravier	Sable a grain moyen	Sable fin	Sable fin
	B- gradation	Uniforme	Uniforme	Gradué	Uniforme	Uniforme
	C- forme des grains	-----	-----	-----	-----	-----
	D -minéralogie	Pas de mica	-----	-----	-----	-----
5. S O L F I N	A -résistance état sec	Faible	Très élevé	Elevé	Moyenne	Très faible
	B -test de dilatance	Rapide	Pas de réaction	Pas de réaction	Rapide	Rapide
	C -rouleau plastique	Faible	Très faible	Très faible	Faible	Faible
	D -classe	argile	Silt	Silt argileux	Argile organique	Argile
6. classification unifiée.		Silt	Gravier	Silt	Sol organique	argile

CONCLUSION :

L'identification et la classification visuelles sont importantes car :

- ✚ Elles peuvent nous dispenser de certains tests de laboratoire.
- ✚ Elles représentent un véhicule de communication pour les ingénieurs c'est-à-dire savoir la façon dont le sol va se comporter dans un ouvrage réel
- ✚ Elles nous permettent d'avoir un aperçu du sol sur le chantier.
- ✚ Elles nous permettent de gagner le temps et le coût.