

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie civil



Polycopié

Manuel des Travaux Pratiques de la Mécanique des Sols I

2^{ème} Année Licence

Génie Civil et Travaux Publics

Elaboré par:

Dr. OUAZIR Khatima

Experts:

Dr. BELMAHI Samir

Dr. BENFERHAT RABIA

Année universitaire : 2024-2025

Avant-propos

Le présent polycopie intitulé : « Manuel des Travaux Pratiques de la Mécanique des sols 1 (TP MDS 1) » est un support pédagogique de la matière « Travaux Pratiques Mécanique des sols 1 » destinée aux étudiants en 2^{ème} Année Licence : GC – TP. Programmée en Unité Méthodologique au Semestre 04, le canevas d'enseignement en question lui attribue deux crédits et un coefficient de 1.

Comme il est question d'un enseignement partiel correspondant nécessairement à des objectifs spécifiques, cette matière vise à acquérir les niveaux de compétence de la connaissance, de l'analyse et de la synthèse à travers les capacités respectives de caractériser les paramètres physiques des sols, de les classer à partir des essais d'identification in-situ et de laboratoire et de maîtriser leur compactage. Il va en soi que l'acquisition soit reliée à des connaissances préalables recommandées (Cours de mécanique des sols.). Ceci d'un côté. De l'autre, il est pertinent de réaliser les Travaux Pratiques au fur et à mesure que nous avançons.

Ce manuel vise à avoir accès en maîtrise et réception transversales à des éléments de connaissance catégorisés en deux niveaux. Niveau des normes de mesurage et niveau de manipulation.

A- Niveau des normes de mesurage :

- 1- Caractériser les paramètres physiques des sols,
- 2- Classer les sols à partir des essais d'identification in-situ et de laboratoire.

B-Niveau d'application :

Manipulation et utilisation des appareils dans les essais d'expérimentation selon le principe de respect des modalités d'usage de la discipline (la précision, le temps de réponse, personnalisation de fonctionnement, ...).

Cinq TP sont prévus pour la mesure par rapport à un seul consacré à l'analyse granulométrique :

- TP N°1 - Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau)
- TP N°2 - Mesure des paramètres de consistance (limites d'Atterberg)
- TP N°3 - Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)
- TP N°4 - Mesure des caractéristiques de compactage et de portance (essais Proctor et CBR)
- TP N°5 - Mesure de la densité in-situ (essai au densitomètre à membrane)

Pour boucler la chaîne expérimentale, il y a lieu d'envisager un mode d'évaluation, le compte- rendu est envisagé.

La réalisation des TP s'inspire bien évidemment de ressources et références tout à fait récentes dont les termes techniques ci-dessous offrent les détails :

- Norme NF P 94 051 (Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau).
- Classification des sols L.C.P.C.

Dr. OUAZIR Khatima

Septembre 2024

Tables des Matières

INTRODUCTION	1
TP N°1: Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau).....	3
1- Problématique.....	3
2- Introduction :	3
3- But de l’essai :	3
4- Intérêt en Génie Civil	3
5- Définitions :	3
6- Principe.....	4
7- Appareillage.....	4
8- Mode opératoire	5
9- Expression des résultats	5
10- Compte rendu	6
Document réponse N°1.....	6
TP N° 2 : Mesure des paramètres de consistance (limites d’Atterberg	7
1- Problématique.....	7
2- Introduction.....	7
3- But de l’essai	8
4- Intérêt en Génie Civil	8
5- Définitions.....	8
6- Principe.....	9
7- Appareillage.....	9
8- Mode opératoire :	9
9- Expression des résultats	12
9.I.2. Détermination de la limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande : :(Methode 2)	12
9.II. Limite de plasticité :	13
9.III. Classification du sol :	13
10- Compte rendu	14
Document réponse N°1	15
Document réponse N°2.....	16
Document réponse N°3.....	17
Document réponse N°4.....	18
TP N°3:Analyse Granulométrique Par Tamisage A Sec et sédimentométrie)	20
Partie 1: Analyse Granulométrique Par Tamisage A Sec	20
1- Problématique.....	20
2- Introduction.....	20
3- But de l’essai	20
4- Intérêt en Génie Civil	20
5- Définitions.....	21
6- Principe.....	22
7- Appareillage.....	22
8- Mode opératoire	22
9- Expression des résultats	23
10- Compte rendu	25
Document réponse N°1.....	25
Document réponse N°2.....	25
Partie2 : Analyse Granulométrique Par sédimentométrie	27
1- But de l’essai	27
2- Domaine d’application	27
3- Appareillage.....	27

4- Compte rendu	31
TP N°4 : Mesure des caractéristiques de compactage et de portance (Essais Proctor et CBR)	32
1- Problématique.....	32
2- Introduction.....	32
3- But de l'essai	32
4- Intérêt en Génie Civil	33
5- Définitions.....	33
6- Principe.....	34
7- Appareillage.....	35
8- Mode opératoire	37
9- Expression des résultats	42
10- Compte rendu.....	43
Document réponse N°1.....	44
Document réponse N°2.....	44
TP N°5: Mesure de la masse volumique sèche in situ.....	46
1- Problématique.....	46
2- Introduction.....	46
3- But de l'essai	46
4- Intérêt en Génie Civil	46
5- Principe.....	46
6- Appareillage.....	47
7- Mode opératoire	47
8- Expression des résultats	48
9- Compte rendu	48
Document réponse N°1.....	49
Références Bibliographiques	50

INTRODUCTION

Ce manuel est composé de cinq TP, chaque TP est une unité d'apprentissage composée de neuf de micro-séquences (Cf. ci-dessous). Introduit par des concepts de pré-requis, le manuel porte essentiellement sur le triptyque du TP (manipulation, application et vérification) au bout duquel le compte-rendu est prévu comme modalité d'évaluation formative.

Pour un plus d'ordre pédagogique, la carte conceptuelle ci-dessous représente mieux graphiquement les subdivisions conceptuelles d'un exemple de TP et précise les relations qui les unissent et les hiérarchisent. Elle propose un réseau sémantique de synthèse bien schématisée.

Les niveaux de compétence retenus dans cette matière cherchent à transformer chez les étudiants leurs capacités en compétences. En fait, il est question de les amener à implémenter et à extrapoler selon un socle de savoirs essentiels

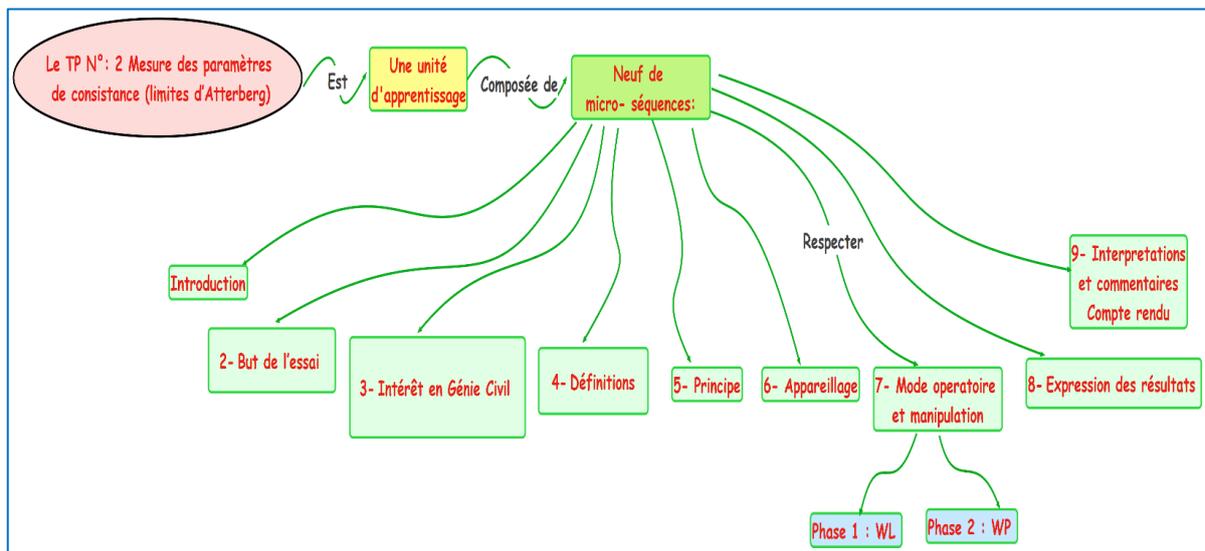


Figure 1 : Carte conceptuelle du contenu technique d'un TP

➤ **Axe fondamental :**

Connaissances disciplinaires : Exploration et utilisation d'éléments et de formules conceptuelles.

➤ **Axe transversal :**

Connaissances connexes (ayant un rapport de ressemblance ou de dépendance avec les connaissances disciplinaires). A traduire ces repères, il est attendu des étudiants qu'ils soient capables d'effectuer certaines opérations mentales telles qu'elles sont définies dans la taxonomie de bloom

-1. Connaissance : retenir des données particulières (des éléments de connaissance), des mots, des termes et des faits

-2. Application : Appliquer un principe et exploiter les éléments de connaissance selon un protocole de mise en œuvre

-3. **Analyse** : Examiner un ensemble complexe -repérer des éléments et les relations entre ces éléments Reconnaître des principes organisateurs d'un ensemble ou d'une structure.

-4. **Synthèse** : Faire une production personnelle et passer à l'acte personnel et élaborer un plan d'action

Carte conceptuelle. Taxonomie de Bloom. Elle illustre le rapport de complémentarité entre les niveaux supérieurs et inférieurs dans l'acte d'apprentissage.

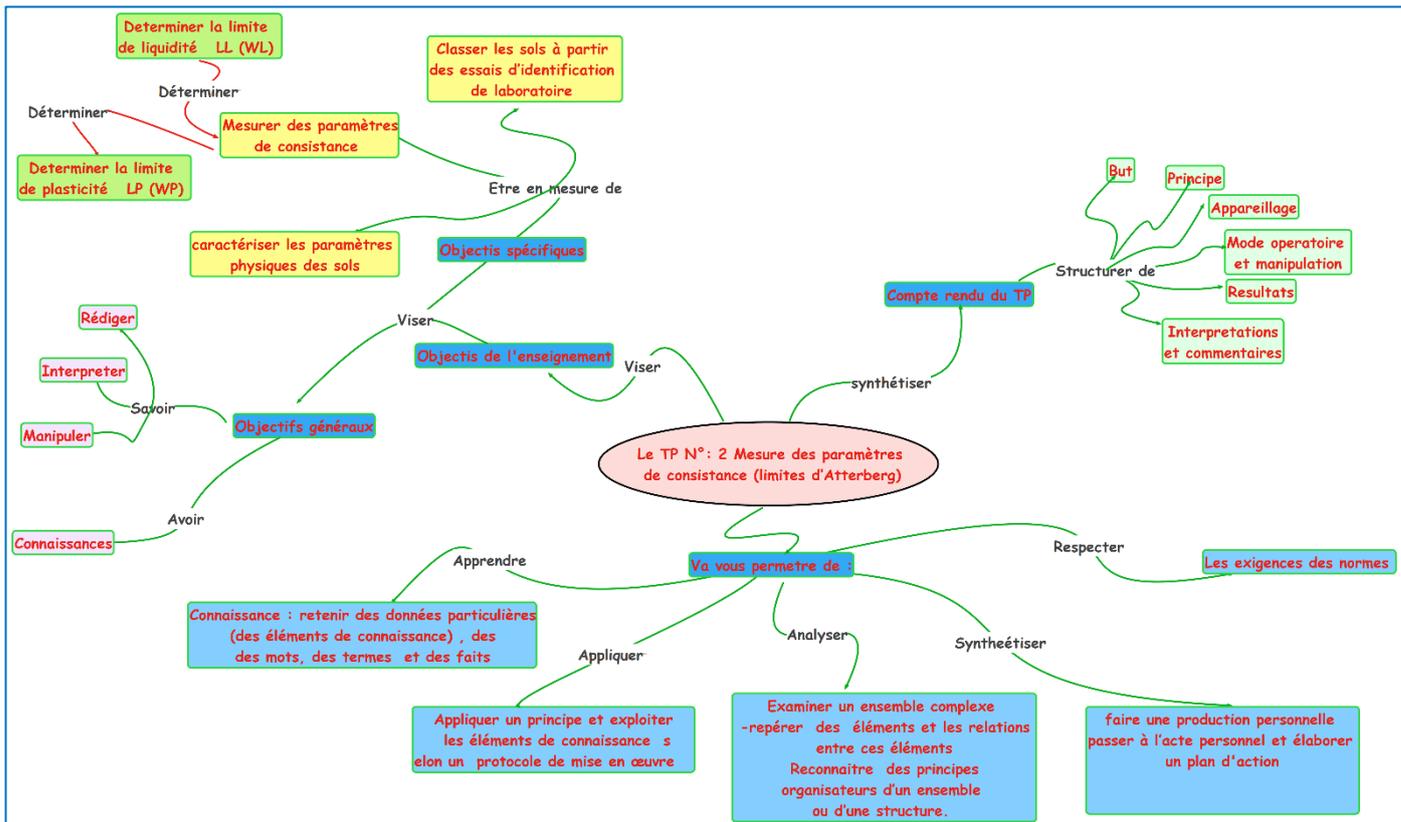


Figure 2 : Carte conceptuelle des visées d'apprentissages d'un TP

La compétence visée ne peut avoir de sens sans les savoirs essentiels : savoir ; savoir-faire et savoir être.

Pour les savoirs, seule la méthode transmissive permet d'assurer le maximum de ramassage de connaissances et de concepts théoriques confrontés à des démonstrations et vérifications bien ficelées.

Au sujet des savoir-faire, synonymes d'application des règles et des principes, les TP permettent de tester votre compréhension, assimilation et maîtrise.

Quant au savoir-être, c'est la démarche personnelle qui engage responsabilité, conscience. C'est l'intelligence personnelle qui s'investit pleinement.

TP N°:1 Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique - teneur en eau)



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche Scientifique
Faculté des Sciences et de la Technologie et Sciences de la Matière
Département des Génie Civil



TP N°1: Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique - teneur en eau)

1- Problématique : Identifier un sol afin de le classer selon les normes.

Documents à consulter :

- ✓ Norme EN NF 933-1(Sols : reconnaissance et essais.
- ✓ Classification des sols L.C.P.C.

2- Introduction :

L'une des plus importantes caractéristiques physiques d'un sol est la teneur en eau. Afin de déterminer les efforts qu'exerce un sol, on doit impérativement déterminer sa teneur en eau. On sait aussi que le poids du sol est à la base de la mobilisation des talus et dans le cas de remblayage pour route, aérodrome.... la teneur en eau est utilisée comme paramètre de contrôle.

3- But de l'essai :

- Détermination de la teneur en eau d'un sol, qui se définit par le poids d'eau contenu dans le poids des vides étant négligeable.
- Bien choisir d'un échantillon d'un sol.
- Savoir-faire d'utiliser le matériel d'un laboratoire.
- Déterminer la teneur en eau d'un sol.

4- Intérêt en Génie Civil

La teneur en eau d'un sol est un paramètre d'état fondamental et détermine son comportement. Pour réaliser un bon compactage de remblai, couche de forme ou corps de chaussée, il est nécessaire de déterminer la valeur en eau idéale du matériau permettant un compactage efficace aboutissant à la meilleure compacité.

5- Définitions :

- * **Teneur en eau :** La teneur en eau d'un échantillon de sol, est le rapport exprimé en pourcentage (%) de la quantité d'eau évaporé après un étuvage de cet échantillon pendant une durée de 24 heures à la température de 105°C au poids de l'échantillon sec.

$$W = \frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100 = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Où :

Wh : Poids humide de l'échantillon.

Ws : Poids de l'échantillon sec.

Ww : Poids de l'eau (Wh-Ws).

TP N°:1 Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique - teneur en eau)

- * **Le poids spécifique Apparent sec :** Le poids spécifique apparent sec est la quantité exprimée par le rapport du poids des grains solides au volume apparent de cet échantillon.

$$\gamma = \frac{W_h}{V_a} = \frac{W_S + W_W}{V_a} = \frac{W_S}{V_a} + \frac{W_W}{V_a}$$

$$\gamma = \frac{W_S}{V_a} + \frac{W_W}{V_a} \times \frac{W_S}{W_S}$$

$$\gamma = \frac{W_S}{V_a} + \frac{W_W}{W_S} \times \frac{W_S}{V_a}$$

$$\gamma = \gamma_d + W \times \gamma_d$$

$$= \gamma_d(1 + W)$$

d'où $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+W}$

γ_d : Poids spécifique apparent sec ;

γ : Poids spécifique apparent ;

W : Teneur en eau ;

W : Teneur en eau ;

V_a : Volume apparent ;

6- Principe :

- La manipulation de la détermination de la teneur en eau d'un sol consiste à mesurer la perte d'eau d'un échantillon représentatif après séchage au four jusqu'à masse constante à une température de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. On compare ensuite cette masse d'eau perdue (évoluée) à la masse des solides obtenus après séchage.
- La perte d'eau d'un échantillon de matériau est provoquée par étuvage. Les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.
- L'échantillon 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.

7- Appareillage :

- Boite de pétri;

- Balance de précision 1/100 de gramme ;
- Etuve ;
- Spatule ;
- Anneau volumique ;



Figure 1 : Boite de pétrie

TP N°:1 Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique - teneur en eau)

8- Mode opératoire :

La méthode consiste à déterminer le volume apparent d'un échantillon de sol à l'aide d'un anneau volumétrique de dimensions connues, et sa teneur en eau.

- 1- Déterminer le volume apparent de l'échantillon (volume de l'anneau volumétrique) ;
- 2- Maître l'anneau dans un fond de boîte à pétri (le tout ayant été préalablement lavé et séché).

- 3- Enfoncer l'anneau dans l'échantillon et araser les deux faces à l'aide d'une spatule ;
- 4- Faire la pesée de l'ensemble (fond de boîte + anneau + échantillon humide) ;
- 5- Etuver l'échantillon pendant 24 heures ;
- 6- Déterminer le poids de l'échantillon sec.

9- Expression des résultats :

La teneur en eau est une grandeur physique définit théoriquement comme étant le rapport du poids de la matière sèche c'est-à-dire aux poids des particules solides, on a donc : $w = (\text{poids de l'eau} / \text{poids du sol sec}) \times 100$

Feuille d'essai :

N° d'essai	01	02	03
Diamètre d'anneau (cm)			
Hauteur (cm)			
Volume apparent V_a (cm ³)			
Poids humide W_h (g)			
Poids sec W_s (g)			
$\gamma = \frac{W_h}{V_a}$			
$W\% = \frac{W_h - W_s}{W_s}$			
$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + W}$			

TP N°:1 Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique - teneur en eau)

Compte rendu :

Il vous est demandé de :

1. Réaliser les essais.
2. Dresser le tableau des résultats. Compléter le tableau des calculs en vous aidant du document réponse N°1.
3. Déterminer la teneur en eau et le poids spécifique apparent sec du sol .

Document réponse N°1

I – Détermination de la teneur en eau et du poids spécifique apparent sec du sol.

Compléter le tableau des calculs suivant :

N° d'essai	01	02	03
Diamètre d'anneau (cm)	4	4	4
Hauteur (cm)	4	4	4
Volume apparent V_a (cm ³)			
Poids humide W_h (g)	22.91	22.94	24.02
Poids sec W_s (g)	19.75	19.87	20.89
$\gamma = \frac{W_h}{V_a}$			
$W\% = \frac{W_h - W_s}{W_s}$			
$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + W}$			



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche Scientifique
Faculté des Sciences et de la Technologie et Sciences de la Matière
Département des Génie Civil



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

1- Problématique : Identifier un sol afin de le classer selon les normes.

Documents à consulter :

- ✓ Norme EN NF P 94 051 (Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg.Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau).
- ✓ Classification des sols L.C.P.C.

2- Introduction :

Le comportement d'un sol varie dans des proportions importantes en fonction de sa teneur en eau.

Pour une valeur élevée de la teneur en eau, le sol se comporte à peu près comme un liquide ; c'est de la boue: les forces de cohésion ne sont pas assez importantes pour maintenir les particules en place.

Quand la teneur en eau diminue, vient la phase plastique ; on peut encore modeler la terre sans qu'elle s'effrite, elle conserve sa forme.

Puis on ne peut plus modeler la terre: elle se fendille au cours du travail: c'est la phase solide.

On peut encore subdiviser cette phase solide. Lorsque la quantité d'eau demeure relativement importante, la pellicule d'eau qui enveloppe les grains repousse ces grains et augmente le volume apparent ; de sorte que, si l'on sèche un tel sol, il y aura retrait. Tandis que, pour une teneur en eau encore plus faible, l'eau ne repoussera plus les particules du sol, et le volume sec sera égal au volume humide: ce sera la phase solide sans retrait.

Les teneurs en eau qui correspondent au passage de l'un à l'autre de ces états sont respectivement :

- ✓ la limite de liquidité LL (WL)
- ✓ la limite de plasticité LP (Wp)
- ✓ la limite de retrait Lr

On appelle indice de plasticité la différence $I_p = LL - L_p$. C'est l'étendue de l'intervalle pendant lequel on peut " travailler " le sol.

On appelle indice de consistance I_c le rapport $(WL - W) / I_p$, étant la teneur en eau du sol à l'état naturel

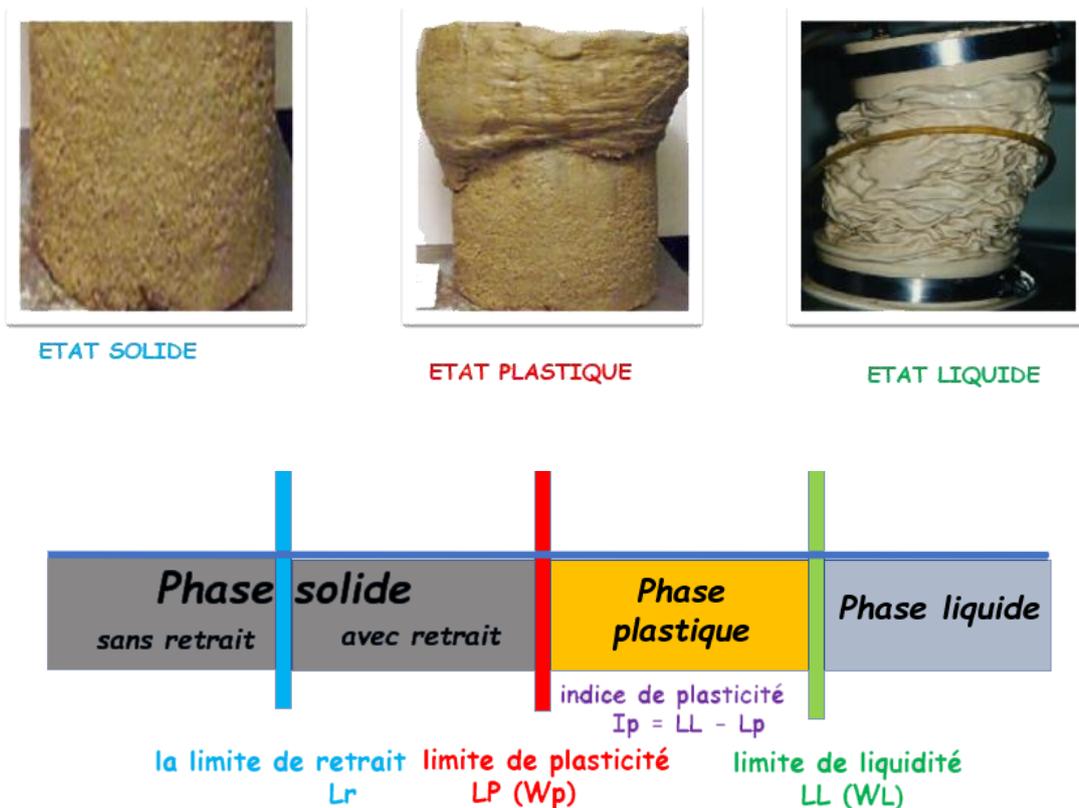


Figure 1 : Les différents états d'un sol et leurs limites

3- But de l'essai :

- ✓ La détermination des deux limites d'Atterberg (W_L, W_P) s'applique aux sols dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille **400 μ m**.
- ✓ Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état au moyen de ses indice de consistance et de plasticité.
- ✓ Les limites d'Atterberg permettent de prévoir le comportement de sols sous l'action des variations des teneurs en eau.

4- Intérêt en Génie Civil

- ✓ Les limites d'Atterberg servent à classer les sols fins ($< 80 \mu\text{m}$).
- ✓ La position de la teneur en eau in-situ (w) par rapport aux limites d'Atterberg permet de prévoir la consistance du sol. (Indice de consistance : $I_c = w_L - w$)/ I_p
- ✓ Les limites d'Atterberg permettent de prévoir le comportement des sols fins pendant les phases de terrassement et / ou lorsqu'ils sont sollicités mécaniquement (contrainte admissible, module d'élasticité).

5- Définitions :

- * **La limite de liquidité (W_L):** Teneur en eau à laquelle un sol cesse d'être plastique pour devenir liquide si on y ajoute de l'eau (état limite). Les sols sans cohésion ne présentent pas de limite de liquidité telle que définie par cet essai. Cette limite est atteinte lorsque le sol se referme sur une longueur de **12 à 13 mm** après être tombé **25 fois**, dans une coupelle prévue à cet effet, à une fréquence de deux chutes par secondes et d'une hauteur de **1 cm**.

- * **La limite de plasticité** (W_p) : Teneur en eau à laquelle un sol cesse de présenter un comportement plastique pour devenir semi-solide si on continue à l'assécher. Les sols sans cohésion ne présentent pas de limite de plasticité. Cette limite est atteinte lorsqu'un rouleau de sol de 3 mm de diamètre commence à se fendiller à la manipulation.
- * **Indice de plasticité** (IP) : Fourchette des teneurs en eau à l'intérieur de laquelle le sol demeure plastique ou malléable :
$$IP = W_L - W_p$$
- * **Indice de consistance** (Ic) : On appelle **indice de consistance** Ic le rapport $(W_L - W) / Ip$, étant la teneur en eau du sol à l'état naturel
$$Ic = \frac{W_L - W}{Ip}$$

6- Principe :

Les limites d'Atterberg consistent en des teneurs en eau limites qui marquent la transition entre deux états de consistance dans un sol cohérent. Ces limites permettent de classer les sols selon leur plasticité et sont obtenues de manière empirique à l'aide de méthodes normalisées.

La manipulation consiste à exploiter les résultats de l'analyse granulométrique d'un sol et à définir ses limites d'Atterberg afin de le classer au sens de la classification

L'essai s'effectue en deux phases :

Phase (1): Recherche de la teneur en eau w_L pour laquelle une rainure de dimension normalisée, pratiquée dans le sol disposé dans la coupelle de Casagrande, se ferme sous l'action de 25 chocs appliqués de manière normalisée.

Phase (2): Recherche de la teneur en eau w_p pour laquelle un cylindre de sol de diamètre 3mm se brise.

7- Appareillage :

Matériel pour la détermination de la limite de liquidité :

1. Des boîtes de pétri, spatules.
2. Une étuve de dessiccation à température réglable à **105 °c** et à **50 °c**.
3. Une balance avec une incertitude de **1/1 000** de la valeur mesurée.
4. Appareil de limite de liquidité (appareil de Casagrande).
5. Un outil à rainurer : L'outil à rainurer ne doit pas être endommagé. Il est important de vérifier la largeur de la rainure afin de toujours respecter les normes.

Matériel pour la détermination de la limite de plasticité :

- * Une plaque lisse en marbre ou en matériau équivalent pour le malaxage et la confection des rouleaux de sol,
- * Des boîtes de pétri, des spatules,
- * Une balance.
- * Une étuve.

8- Mode opératoire :

L'essai se fait en 2 phases :

- ✓ Recherche de la teneur en eau W_L pour laquelle une rainure de dimension normalisée, pratiquée dans un sol placé dans une coupelle se referme sur 1 cm lorsque celle-ci et son contenu sont soumis à 25 chocs répétés. (Appareil de Casagrande : limite de LIQUIDITE)
- ✓ Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement se fissure. (« petits rouleaux » : LIMITE DE PLASTICITE).

8.1. Phase 1 : Détermination de la limite de liquidité :

Répartir avec la spatule, dans la coupelle propre et sèche, une masse d'environ **70 g** de pâte. Cette pâte étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air, présente en fin d'opération un aspect symétrique comme indiqué **figure 2**.

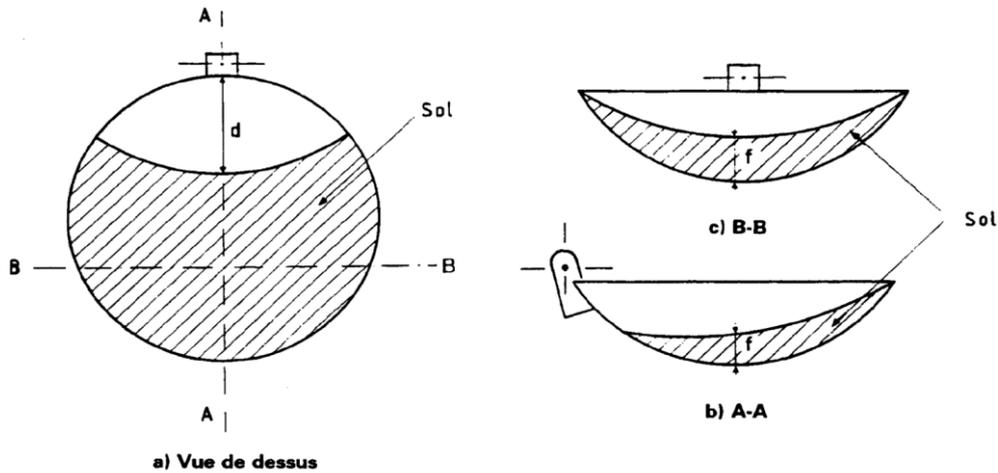


Figure 2 : remplissage de la coupelle de Casagrande.

La pâte recouvre le fond de la coupelle, sauf sur une partie **d** d'environ **3 cm** (**figure 2a**) et son épaisseur **f** est, au centre, de l'ordre de **15 à 20 mm** (**figures 2b**) et **4c**).

Partager la pâte en deux, comme représenté sur la **figure 3**, au moyen de l'outil à rainurer de la **figure 2**, en le tenant perpendiculairement à la surface de la coupelle et en présentant sa partie biseautée face à la direction du mouvement.

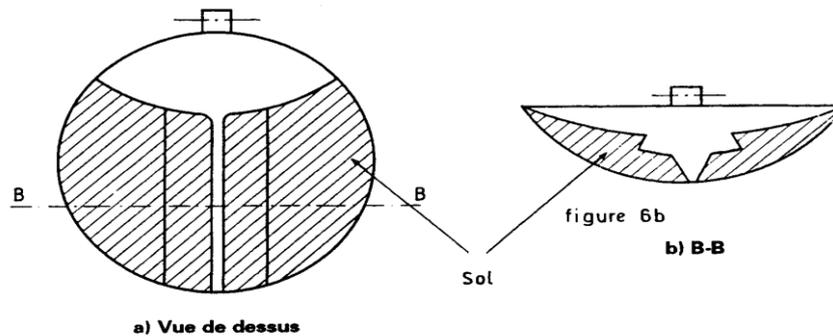


Figure 3 : réalisation de la rainure.

Noter le nombre **N** de chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ **1 cm** comme représenté sur la **figure 4**.

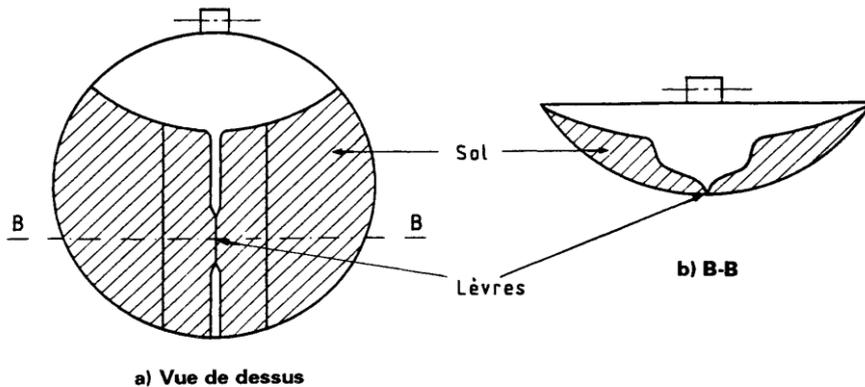


Figure 4 : fermeture de la rainure.

Si **N** est inférieur à **15**, le processus est recommencé avec un matériau plus sec et homogénéisé à nouveau (le séchage peut, éventuellement, être accéléré par un malaxage sous flux d'air chaud à une température inférieure à **50 °C**).

Si **N** est supérieur à **35**, l'opération est renouvelée sur un prélèvement de pâte auquel a été ajouté un peu d'eau distillée ou déminéralisée.

L'essai n'est poursuivi que lorsque **N** est compris entre **15** et **35**.

Prélever dans la coupelle, à l'aide d'une spatule, environ **5 g** de pâte, de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées.

8.1. Phase 1 : Détermination de la limite de plasticité :

- ☞ Former une boulette à partir de la pâte préparée.
- ☞ Rouler la boulette sur une plaque lisse, à la main ou éventuellement à l'aide d'une plaquette, de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne **3 mm** de diamètre.
- ☞ La cadence du mouvement de la main doit être régulière.
- ☞ L'amincissement du rouleau se fait de manière continue et sans effectuer de coupure dans le sens de sa longueur.
- ☞ Le rouleau au moment où il atteint un diamètre de **3,0 mm ± 0,5 mm** doit avoir environ **10 cm** de longueur et ne doit pas être creux.
- ☞ La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint **3 mm ± 0,5 mm**.
- ☞ Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau est réintégré à la boulette. La pâte est malaxée tout en étant séchée légèrement, éventuellement sous un flux d'air chaud à une température inférieure à **50 °C**.
- ☞ Reformuler un nouveau rouleau.
- ☞ Prélever, une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau et la placer dans une boîte de Pétri de masse connue, la peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau (**NF P 94-050**).
- ☞ Effectuer un deuxième essai sur une nouvelle boulette.

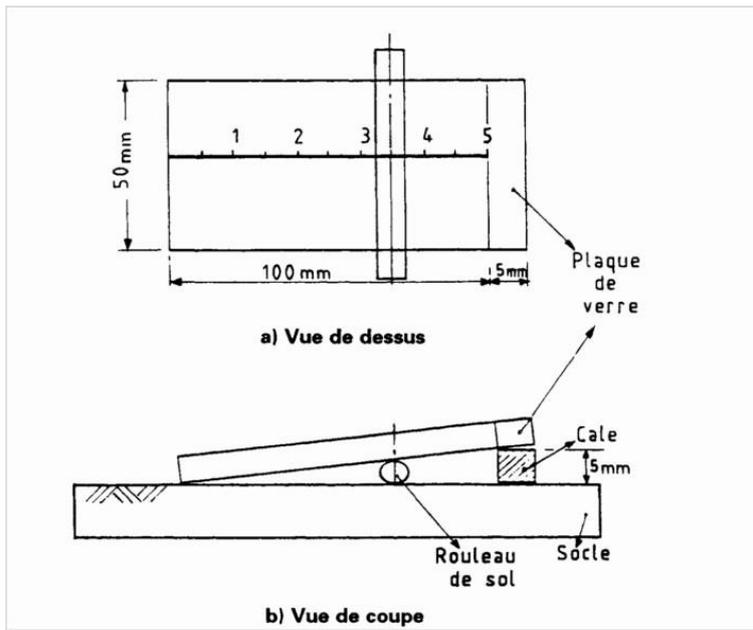


Figure 5 : Réalisation du rouleau de sol de 3 mm de diamètre.

9- Expression des résultats :

9.I. Limite de liquidité :

La limite de liquidité W_L est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur **1 cm** des lèvres de la rainure après **25 chocs**.

Elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales ($\lg(N)$, w).

Cette droite moyenne ne peut être déterminée sans un minimum de quatre points. La relation n'est acceptable que si l'écart de teneur en eau entre la valeur mesurée et la valeur calculée pour le même nombre de coups n'excède pas **3 %**. S'il n'en est pas ainsi, refaire une mesure.

La limite W_L est obtenue pour une valeur N égale à **25**.

9.I.1. Détermination de la limite de liquidité analytique (méthode de Casagrande) :

La limite de liquidité analytique (méthode de Casagrande) estimée par la formule suivante:

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

ωN est la teneur en eau correspondant au nombre de coups N .

Compléter les résultats du tableau du document réponse N°1 et déterminer la valeur de la limite de liquidité. On fera la moyenne des trois essais.

9.I.2. Détermination de la limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande : (Méthode 2)

Porter les couples (Nb de chocs, teneur en eau en %) du tableau du document réponse N°1 sur le quadrillage semi-logarithmique du document réponse N°2. Tracer la droite moyenne et déterminer la valeur de la limite de liquidité.

TP N°:2 LIMITES D'ATTERBERG

(Selon la Norme NF P 94-051)

C'est à dire Tracer la courbe $w=f(N)$ la limite de liquidité est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales ($\lg(N)$, w).

9.II. Limite de plasticité :

Détermination de la limite de plasticité en faisant la moyenne des valeurs de teneur en eau obtenues et dresser dans le tableau des résultats,

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

9.III. Classification du sol :

- ✓ Calculer l'indice de plasticité de ce sol à partir des résultats obtenus dans les documents Réponse N°1 et N°2.
- ✓ Calculer l'indice de consistance I_c de ce sol dont la teneur en eau in-situ est de 18 %.
- ✓ Situer l'état de sol selon l'indice de plasticité I_p
- ✓ Classer le sol selon l'abaque de plasticité de Casagrande ci - dessous.

Annexe :

Indice de plasticité I_p	État du sol
0 - 5	Non plastique
5 - 15	Peu plastique
15 - 40	Plastique
> 40	Très plastique

✓ Commenter vos résultats ?

Tableau : Classification du sol selon l'indice de plasticité I_p .

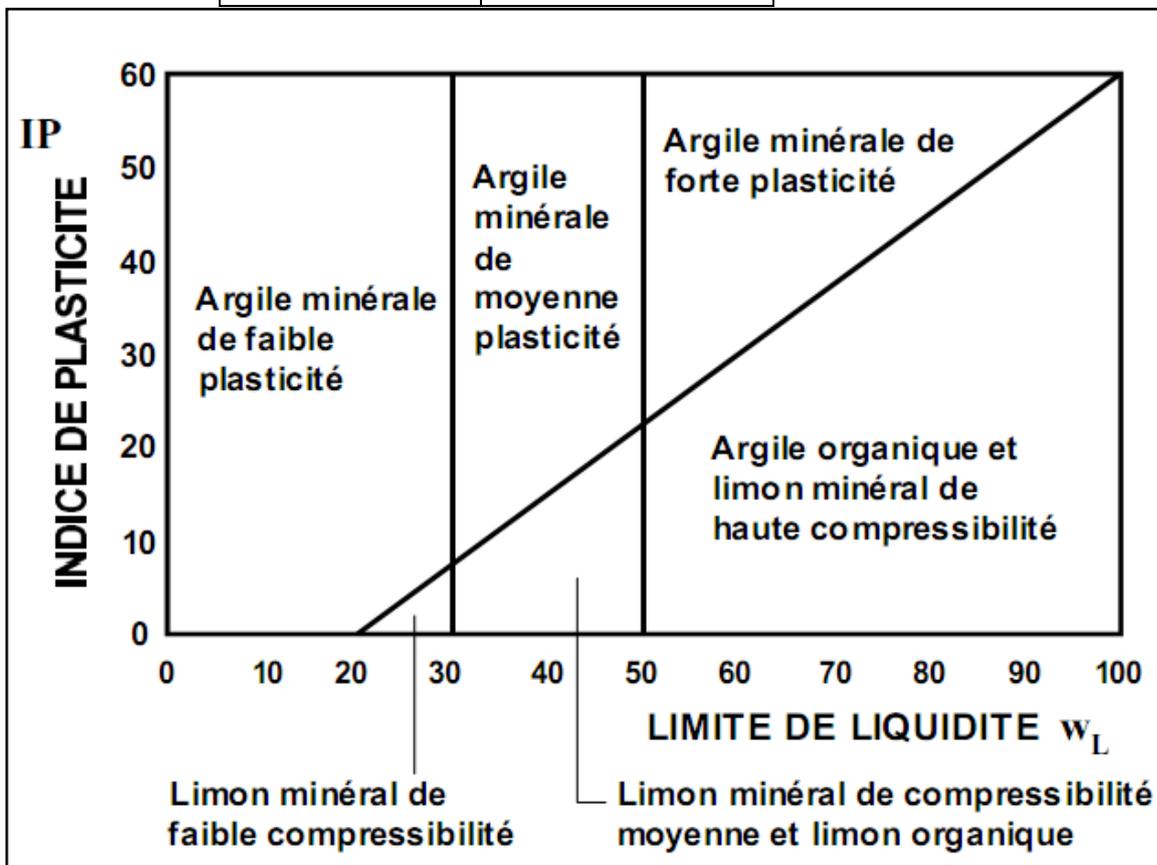


Figure 6 : Abaque de plasticité de Casagrande.

Compte rendu :

Il vous est demandé de :

- 1) Réaliser les essais.
- 2) Dresser les tableaux des résultats.
- 3) Tracer la courbe $w = f(N)$.
- 4) Déterminer la limite de liquidité analytique (méthode de Casagrande) en vous aidant du document réponse N°1.
- 5) Déterminer la limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande en vous aidant du document réponse N°2.
- 6) Déterminer la limite de plasticité en vous aidant du document réponse N°4.
- 7) Situer l'état de sol selon l'indice de plasticité I_p en vous aidant du document réponse N°4
- 8) Classer le sol selon l'abaque de plasticité de Casagrande en vous aidant du document réponse N°4
- 9) Commenter vos résultats ?

Document réponse N°1**I - Limite de liquidité :****I-1- Détermination de la limite de liquidité analytique (méthode de Casagrande) :**

Déterminer la limite de liquidité analytique (méthode de Casagrande) estimée par la formule suivante:

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

ω_N est la teneur en eau correspondant au nombre de coups N.

Compléter les résultats du tableau ci-dessous et déterminer la valeur de la **limite de liquidité**

Numéro d'essai	Essai 1		Essai 2		Essai 3	
Nbre de coups [N]	15		20		32	
Numéro de la tare	1	2	3	4	5	6
Masse totale humide Pth	132.8	140.0	169.8	122.0	132.8	141.6
Masse totale sèche PtS	115.0	121.0	147.4	106.5	116.0	123.8
Masse tare Pt	37.2	36.4	45.4	36.3	35.3	37.3
Masse d'eau PE PE =Pth-PtS						
Masse sèche PS PS=PtS-Pt						
Teneur en eau W % w % =(Ph-PS)/PS						
Teneur en eau moyenne						
Limite de liquidité WL (LL)						

On fera la moyenne des trois essais.

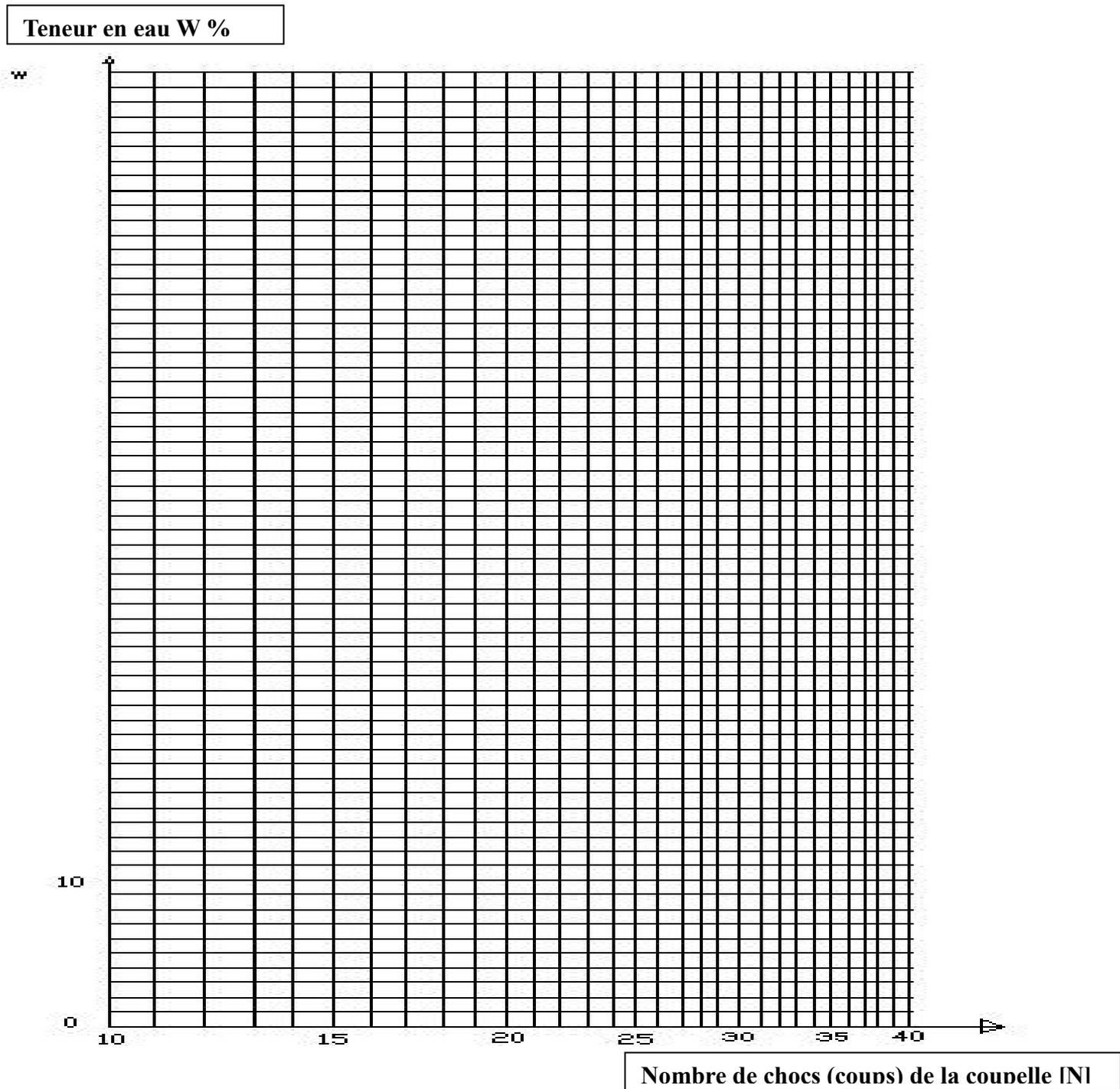
Document réponse N°2

I - Limite de liquidité :

I-2- Détermination de la limite de liquidité avec l'appareil de Casagrande :

Porter les couples (Nb de chocs, teneur en eau en %) du tableau du document réponse N°1 sur le quadrillage semi-logarithmique du document réponse N°2 ci-dessous. Tracer la droite moyenne et déterminer la valeur de la **limite de liquidité**.

C'est à dire Tracer la courbe $w = f(N)$ la limite de liquidité est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales ($\lg(N)$, w).



I-3- Comparer les valeurs de la limite de liquidité obtenues avec les deux méthodes.

Document réponse N°3**II - Limite de plasticité :**

Déterminer la **limite de plasticité** en faisant la moyenne des valeurs de teneur en eau obtenues sur le document réponse N°3.

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

Numéro d'essai	Essai 1		Essai 2	
	1	2	3	4
Numéro de la tare				
Masse totale humide Pth	81.6	80.0	74.9	71.8
Masse totale sèche PtS	75.1	73.6	69.2	66.5
Masse tare Pt	36.4	37.8	36.8	35.1
Masse d'eau PE PE =Pth-PtS				
Masse sèche PS PS=PtS-Pt				
Teneur en eau W % w % =(Ph-PS)/PS				
Teneur en eau moyenne				
Limite de plasticité Wp (Lp)				

Document réponse N°4

III - Classification du sol :

III - 1- Calculer l'indice de plasticité de ce sol à partir des résultats obtenus dans les documents

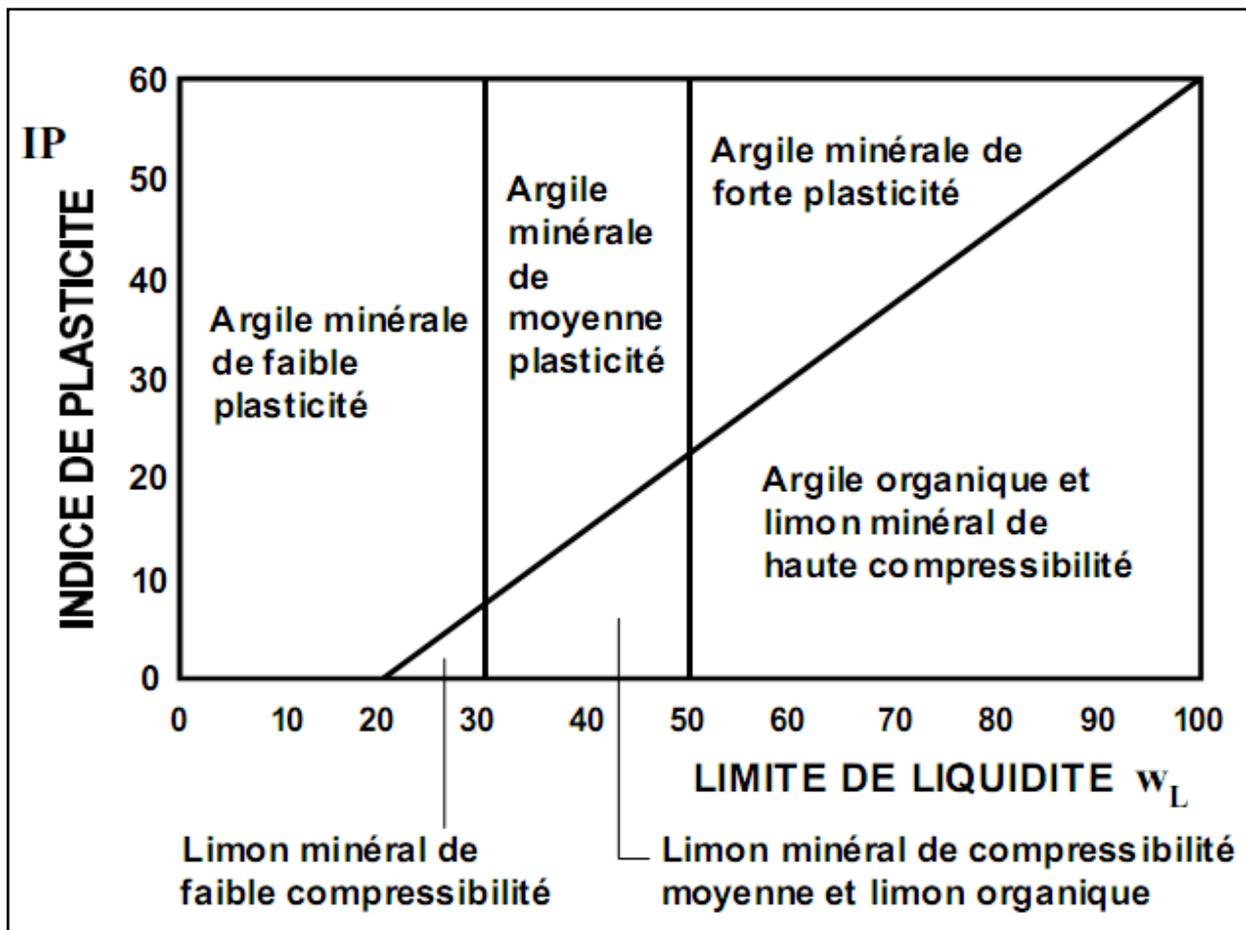
Réponse N°1 et N°2.

III - 2- Calculer l'indice de consistance I_c de ce sol dont la teneur en eau in-situ est de 18 %.

III - 3- Situer l'état de sol selon l'indice de plasticité I_p

III - 4- Classifier le sol selon l'abaque de plasticité de Casagrande ci - dessous.

III - 5- Commenter vos résultats ?



**Fig. :
Figure**

Figure : Abaque de plasticité de Casagrande.

Indice de plasticité I_p	État du sol
0 - 5	Non plastique
5 - 15	Peu plastique
15 - 40	Plastique
> 40	Très plastique

Tableau : Classification du sol selon l'indice de plasticité I_p

CLASSIFICATION DES SOLS FINS
Plus de 50 % des éléments < 0.08mm

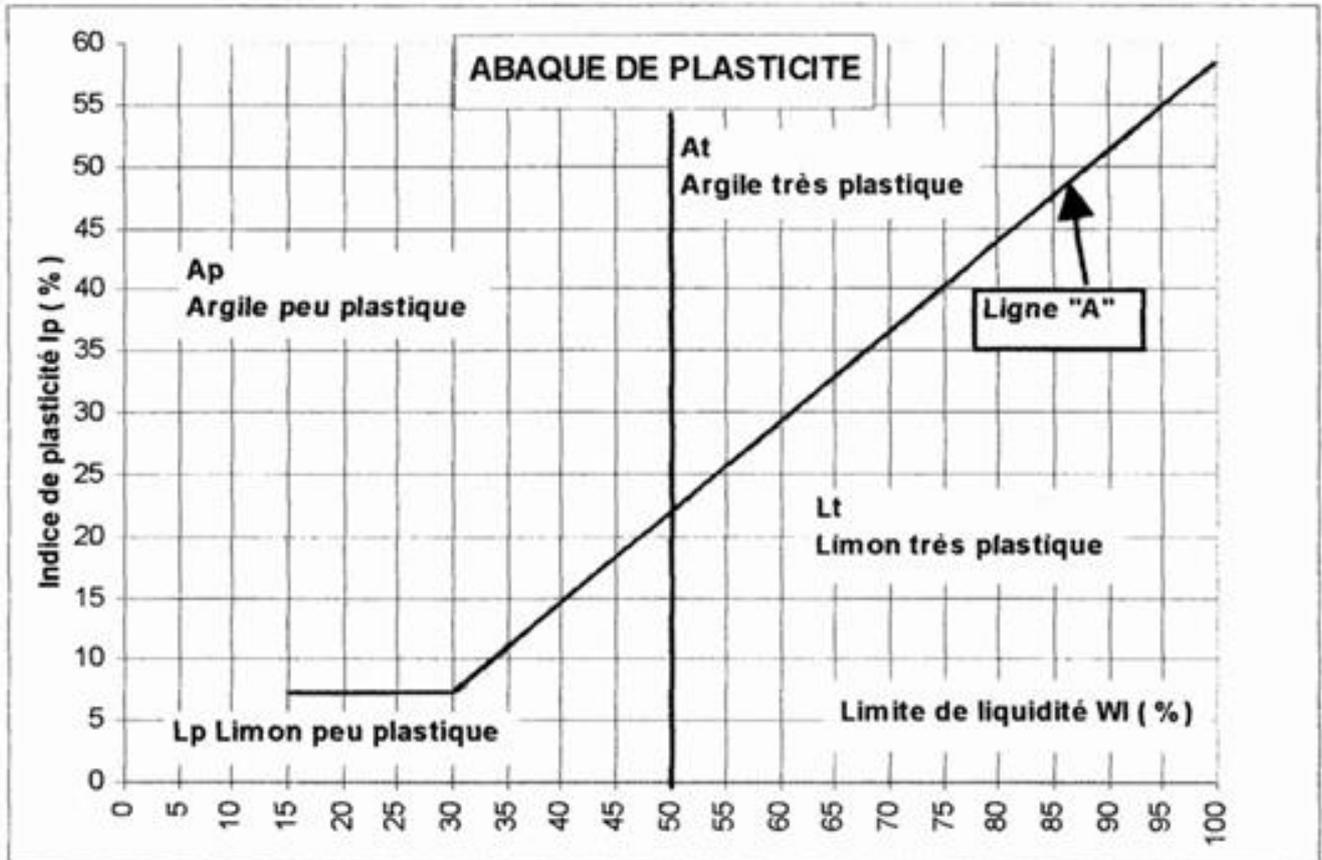


Figure 6 : Abaque de plasticité de Casagrande.



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche Scientifique
Faculté des Sciences et de la Technologie et Sciences de la Matière
Département des Génie Civil



TP N°3:Analyse Granulométrique Par Tamisage A Sec et sédimentométrie)

Partie 1: Analyse Granulométrique Par Tamisage A Sec

1- Problématique : Identifier un sol afin de le classer selon les normes.

Documents à consulter :

- ✓ Norme EN NF 933-1(Sols : reconnaissance et essais.
- ✓ Classification des sols L.C.P.C.

2- Introduction :

L'analyse granulométrique d'un sol est l'étude des dimensions des diamètres des grains, leur distribution, de différencier les sols entre eux, roche, gravier, argile... etc.

La détermination de la distribution de la taille des particules, ou en composition granulométrique du sol, est appelée analyse granulométrique d'un sol.

Les sols sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par tamisage sur des tamis ou passoirs

3- But de l'essai :

- L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un sol. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le sol.
- L'analyse granulométrique permet de séparer le sol en fractions granulaires et de déterminer la distribution en poids des particules suivant leurs dimensions ce qui facilite l'identification de certaines propriétés du sol.
- Déterminer les proportions des particules solides de différentes tailles qui constituent le sol.
- L'analyse granulométrique a quatre buts :
 - a. Déterminer les dimensions des grains.
 - b. Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
 - c. En déduire le Coefficient ou facteur d'uniformité (Cu).
 - d. En déduire le Coefficient ou facteur de courbure (Cc)

4- Intérêt en Génie Civil

Les sols utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil sont de dimensions différentes comprises entre 0 et 80 mm. Ils ne sont généralement pas constitués par des éléments de tailles égales mais par un ensemble de grains dont les tailles variées.

L'analyse granulométrique permet :

- ✓ De distinguer les sols suivant des classes granulaires. Dans le domaine des travaux publics, l'analyse granulométrique permet aussi de répertorier les sols notamment au niveau des classements LCPC et GTR.
- ✓ D'accéder aux caractéristiques des vides par celles des grains ;

- ✓ De classer quantitativement les roches meubles et de dresser des cartes, trame de la distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques ;
- ✓ De calculer les paramètres granulométriques ;
- ✓ De procéder à l'équipement technique des puits et sondages : calcul de l'ouverture des parties captantes (crépines), calibrage du gravier des massifs filtrants.

5- Définitions :

- * **Analyse granulométrique par tamisage** : ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.
- * **Dimension nominale d'ouverture d'un tamis d** : dimension caractéristique de la maille carrée de coté d.
- * **Le Refus sur un tamis** : désigne la **partie** des grains retenue sur un tamis.
- * **Le Tamisât ou passant** : désigne la partie passant à travers les mailles d'un tamis.
- * **Classe granulométrique** : ensemble des éléments dont les dimensions sont comprises entre deux ouvertures d de tamis définissant un intervalle.
- * **Pourcentage massique de refus** : rapport, exprimé en pourcentage, de la masse de matériau sec retenu par un tamis d'ouverture d, à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.
- * **Pourcentage massique d'un tamisât** : rapport, exprimé en pourcentage, de la masse sèche du passant à travers un tamis d'ouverture d, à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.
- * **Courbe granulométrique** : représentation du pourcentage massique p des différents tamisâts en fonction de la dimension nominale d'ouverture des tamis.
- * **Dimension nominale d'ouverture à N pour cent(d_N)** : dimension interpolée sur la courbe granulométrique pour laquelle le pourcentage massique p de tamisât est égal à N pour cent.
- * **Dimension nominale d'ouverture à N pour cent(d_n)** : dimension interpolée sur la courbe granulométrique pour laquelle le pourcentage massique p de tamisât est égal à N pour cent.
- * **Coefficient ou facteur de courbure** : Sur le passant au tamis de 63mm, rapport des dimensions des mailles de tamis défini par :

$$C_c = d_{30}^2 / d_{10} \cdot d_{60} = C_u (d_{60} / d_{10})^2$$

A noter : Un sol est bien gradué si C_c est compris entre 1 et 3.

- * **Coefficient ou facteur d'uniformité** : Sur le passant au tamis de 63 mm, rapport des dimensions des mailles de tamis pour lesquels il y a respectivement 60% et 10% de passant :

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

C_u : Coefficient d'uniformité Ou Coefficient de HAZEN.

- Si $C_u > 2$ La granulométrie est étalée (ou variée).
- Si $C_u < 2$ La granulométrie est uniforme (ou serrée).
- **d₁₀** : Représente le diamètre (ouverture du tamis) à travers duquel passe 10% du matériau (10% du poids du matériau).

- **d30** : Représente le diamètre (ouverture du tamis) à travers duquel passe 30% du matériau (30% du poids du matériau).
- **d60** : Représente le diamètre (ouverture du tamis) à travers duquel passe 60% du matériau (60% du poids du matériau).

6- 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.

La granulométrie ou analyse granulométrique consiste donc à fractionner le sol au moyen d'une colonne de tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas entre 80 mm et 0,063 mm.

On appelle tamisât ou passant l'ensemble des grains qui passent à travers le tamis, et refus l'ensemble des grains qui sont retenus sur le tamis.

7- Appareillage :

- ✓ Une machine à tamiser
- ✓ Une série de tamis conformes à la Norme NF X 11-501 et NF X 11-504
- ✓ Un couvercle qui évite la perte de matériau pendant le tamisage et un réceptacle de fond pour recueillir le dernier tamisât.
- ✓ Des récipients en plastique
- ✓ Une main écope pour le remplissage
- ✓ Une balance de portée 5 kg, précision 1 g



Figure 1 : La machine à tamiser et Une série de tamis .

8- Mode opératoire :

- ✓ 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) :

3,15 - 2 - 1,25 - 0,5 - 0,25 - 0,125 - 0,08

- ✓ Prendre un kilogramme de sol.

La pesée de l'échantillon de



Figure 2 : La pesée de l'échantillon de sol

- ✓ Verser le sol sur le tamis supérieur puis fermer la colonne par le couvercle.
- ✓ Placer la colonne des tamis sur le vibreur.
- ✓ Procéder à l'agitation pendant 5 min.
- ✓ Procéder à la pesée cumulée des refus en commençant par le tamis supérieur.
- ✓ Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés ...

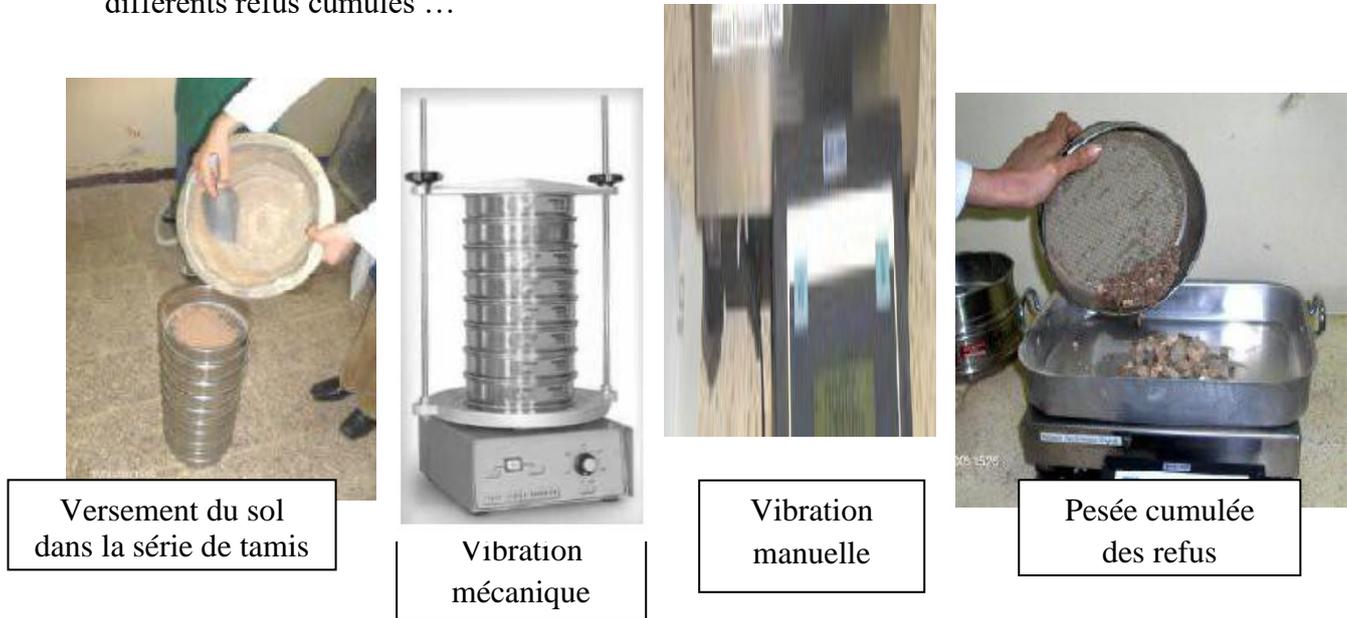


Figure 3 : Réalisation des différentes étapes de l'essai

9- Expression des résultats :

Le traitement statistique des données de l'analyse granulométrique est la courbe granulométrique cumulative.

Le couple de données concernant une phase granulométrique, diamètre et poids, obtenu par tamisage, est porté sur le graphique :

- En abscisses logarithmiques les diamètres des grains, en mm, déterminés par les dimensions des mailles des tamis ;
- En ordonnée linéaire les poids cumulés, en grammes, exprimés en pourcentage du poids de l'échantillon étudié.

Le graphique obtenu est la courbe granulométrique cumulative. Cette courbe permet de calculer les principaux paramètres granulométriques: les diamètre caractéristique D10, D30 et D60 et les deux coefficients Cu (coefficient d'uniformité) et Cc (coefficient de courbure)

Le diamètre caractéristique, d10 est mesuré par la valeur lue abscisse, correspondant à un pourcentage en poids cumulé.

Le coefficient d'uniformité, **U** (sans dimension), attribue une valeur numérique à la pente de la courbe. Il est calculé par le rapport suivant : $Cu = d60/d10$

Par convention, si U est compris entre 1 et 2, la granulométrie est dite uniforme.

S'il est supérieur à 2, elle est variée

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

I-Calcul des pourcentages

- ☞ Soit M est la masse totale de l'échantillon.
- ☞ Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille : soit R1 la masse de ce refus.

- ☞ Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés ...
- ☞ Les masses des différents refus cumulés R_i sont rapportées à la masse totale de l'échantillon m_1 .
- ☞ Les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus, sont inscrits sur la feuille d'essai. Le pourcentage des tamisats cumulés sera déduit.

N° du tamis	Ouverture des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisa cumulé (%)
1	M1	M1	$R1=100x(m1)/M$	$T1=100-R1$
2	M2	$M1+m2$	$R2=100x(m1+m2)/M$	$T2=100-R2$
3	M3	$M1+m2+m3$	$R3=100x(m1+m2+m3)/M$	$T3=100-R3$

II-Tracé de la courbe granulométrique :

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats cumulés sur une feuille semi-logarithmique :

- en abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique
- en ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.
- La courbe doit être tracée de manière continue.

Compte rendu :

Il vous est demandé de :

1. Réaliser les essais.
2. Dresser le tableau des résultats. Compléter le tableau des calculs en vous aidant du document réponse N°1
3. Tracer la courbe granulométrique en vous aidant du document réponse N°2.
4. Déterminer les différents diamètres (D10, D30 et D60) et les deux coefficients C_u (coefficient d'uniformité) et C_c (coefficient de courbure), en sachant que :
 - ☞ D10, D30 et D60 : étant respectivement les diamètres correspondant à 10%, 30% et 60% d'éléments de dimension inférieure.
 - ☞ Le coefficient d'uniformité ou de Hazen : $C_u = d60/d10$,
 - ☞ Le coefficient de courbure : $C_c = d30^2 / d10 \cdot d60 = C_u (d60 / d10)^2$
5. Nommer ce sol selon la classification LCPC.
6. Commenter vos résultats

Compte rendu :

Il vous est demandé de :

1. Réaliser les essais.
2. Dresser le tableau des résultats. Compléter le tableau des calculs en vous aidant du document réponse N°1
3. Tracer la courbe granulométrique en vous aidant du document réponse N°2.
4. Déterminer les différents diamètres (D10, D30 et D60) et les deux coefficients Cu (coefficient d'uniformité) et Cc (coefficient de courbure), en sachant que :
 - ☞ D10, D30 et D60 : étant respectivement les diamètres correspondant à 10%, 30% et 60% d'éléments de dimension inférieure.
 - ☞ Le coefficient d'uniformité ou de Hazen : $Cu = d60/d10$,
 - ☞ Le coefficient de courbure : $Cc = d30^2 / d10 \cdot d60 = Cu (d60 / d10)^2$
5. Nommer ce sol selon la classification LCPC.
6. Commenter vos résultats

Document réponse N°1

I - calcul des pourcentages :

Compléter le tableau des calculs suivant:

M=1000g

Ouverture des Tamis (mm)	Refus Partiel (g)	Refus Cumulé (g)	Tamisât Partiel (g)	Tamisât Cumulé (g)	Tamisât Cumulé (%)
5	000.0				
2.5	161.0				
1.25	136.0				
0.63	177.0				
0.315	304.0				
0.16	152.0				
0.08	54.0				
Fond	7.5				

Document réponse N°2

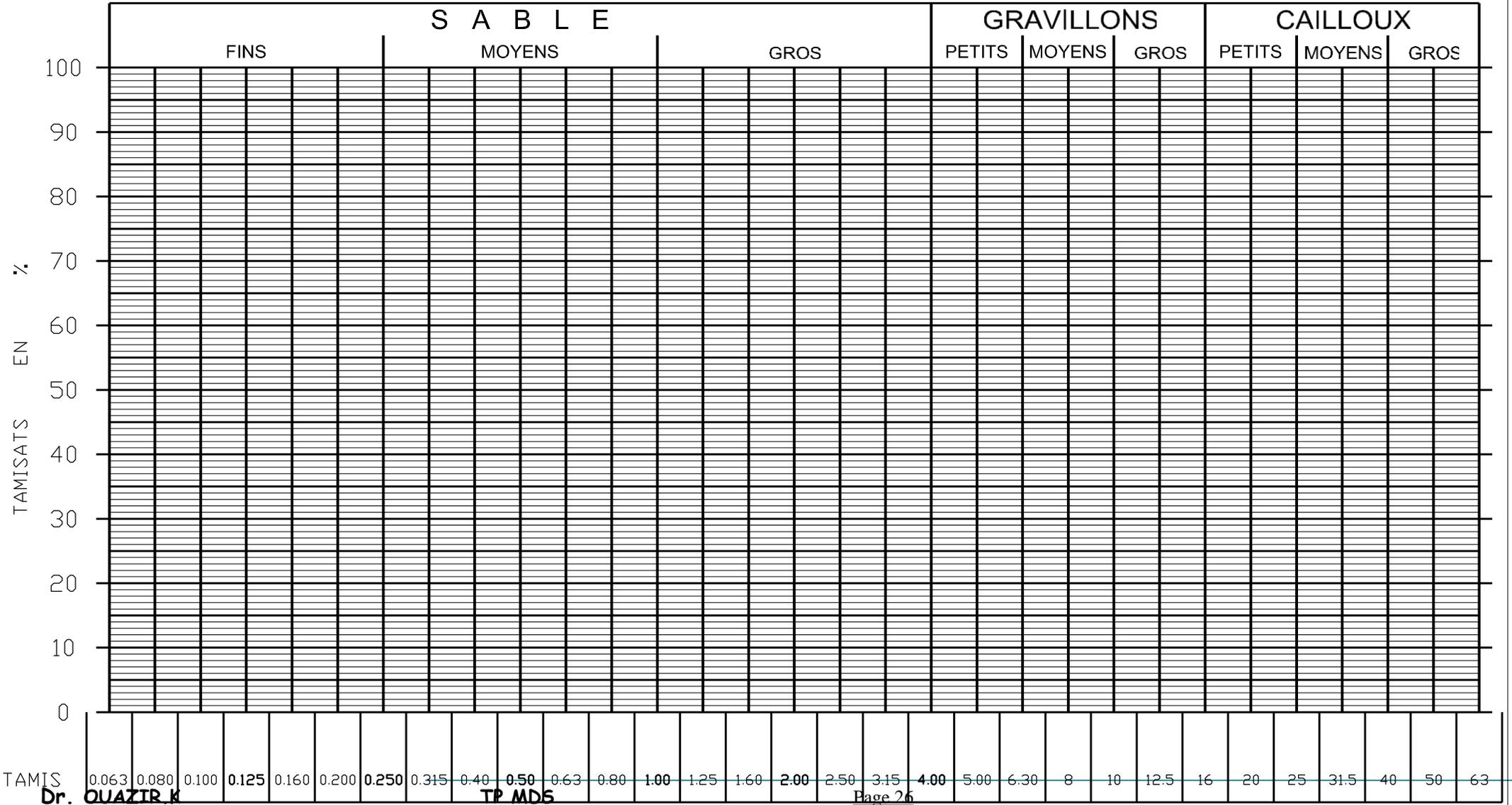
II - Tracé de la courbe granulométrique :

Porter les divers pourcentages des tamisats cumulés du tableau du document réponse N°1 en le quadrillage semi-logarithmique du document réponse N°2 ci-dessous.

- en abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique
- En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.
- La courbe doit être tracée de manière continue.

Tracer la courbe granulométrique et déterminer les principaux paramètres granulométriques : les diamètre caractéristique D10, D30 et D60 et les deux coefficients Cu (coefficient d'uniformité) et Cc (coefficient de courbure)

Analyse Granulométrique



TPN°3:Analyse Granulométrique Par Tamisage A Sec et sédimentométrie)**Partie2 : Analyse Granulométrique Par sédimentométrie****1- But de l'essai :**

La sédimentométrie complète l'analyse granulométrique par tamisage, elle donne la répartition des grains de diamètre inférieur à 80 μm .

2- Domaine d'application :

Le présent essai s'applique aux éléments d'un sol naturel passant à travers le tamis à maille carrée de **80 μm** d'ouverture. Les particules de taille inférieure à 1 μm ne peuvent cependant pas être différenciées par cet essai.

L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai géotechnique qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol (**norme NF P 94-056**) et qui peut être nécessaire à sa description et à sa classification.

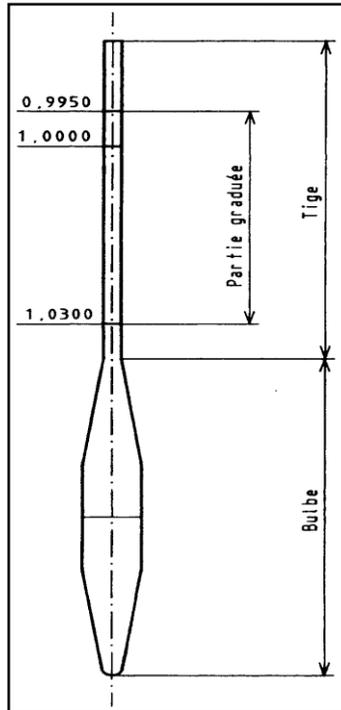
3- Appareillage :

- Balance avec une incertitude de **1/1000** de la valeur mesurée.
- Tamis à maille carrée de **80 μm** d'ouverture et de diamètre supérieur ou égal à **250 mm**.
- Un bac non altérable et de dimensions minimales **60 cm x 40cm x 12 cm** pour recueillir le tamisât à **80 μm** .
- Une étuve de dessiccation, à température réglable à **105 °C** et à **50 °C**.
- Un mortier de **20 cm** de diamètre minimal avec son pilon en matériau souple pour séparer les particules de sol passées au tamis de **80 μm** d'ouverture.
- Un agitateur mécanique avec son récipient. La vitesse de rotation de l'agitateur doit pouvoir être réglée jusqu'à **10000 tr/min**. Il doit être de type «plongeant», c'est-à-dire que l'arbre support de la palette rotative est introduit dans le récipient contenant la solution. Ce récipient doit avoir une contenance minimale de **600 cm^3**
- Un mélange d'eau distillée ou déminéralisée additionnée d'un défloculant pour imbiber puis disperser l'échantillon. Ce mélange est constitué à partir de **440 cm^3** d'eau distillée ou déminéralisée et de **60 cm^3** d'une solution à **5 %** d'hexamétaphosphate de sodium(**$\text{Na}_6(\text{P}_3\text{O}_{10})_6, 10\text{H}_2\text{O}$**) préparée et conservée à l'abri de la lumière depuis moins d'un mois.
- Le densimètre doit être tel que le mesurage soit effectué avec une exactitude de **0,0005**. La plage d'utilisation de l'instrument est de **0,9950 à 1,0300**. Il doit être de forme torpille avec un centre de poussée au voisinage du milieu du bulbe.

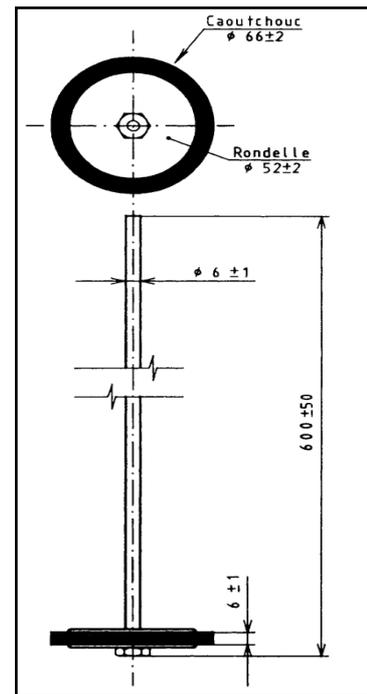
- Les deux instruments de mesure de la température doivent être tels que le mesurage soit effectué avec une exactitude de **0,5 °c**. La plage d'utilisation des thermomètres est de **10 à 35 °c**.
- L'appareil doit permettre un affichage de la mesure du temps à la seconde près.
- Un thermomètre enregistreur de contrôle doit être placé en permanence dans la salle d'essai.



Agitateur mécanique



Densimètre



Agitateur manuel

Figure 4 : Appareillage

4- Mode opératoire

1. Prendre deux éprouvettes à essais de 1 litre de contenance.
2. Prendre **60 cm³** de défloculant et ajouter **440 cm³** d'eau distillée pour obtenir une solution de **500 cm³**.
3. Diviser la solution obtenue (500 cm³) entre les deux éprouvettes à raison de **250 cm³** 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.



Figure 5 : réalisation de l'essai

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_t).
- 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^{ème} 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_B).
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.

5- Expression des résultats :

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:

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

avec : V = Vitesse de décantation de la particule

g = accélération de la pesanteur

γ_s = poids spécifique de la particule (valeur moyenne : 26.5 kN/m³) γ_w = poids spécifique de l'eau ($\gamma_w = 10$ kN/m³).

η = 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

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

avec :

H = hauteur séparant le milieu du bulbe du densimètre de la graduation 1,0000 (H = 22,2 cm)

H1 = la distance séparant la graduation 1,0000 de la graduation 1,0100 (H1 = 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	1.19	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 + Cor avec 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 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 (Cor = 0).

(1) Calcul de D

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

R = R_c = 1,007

R_t = 0,997

t = 2 min

H_r = H - 100 . H₁ . (R_c - R_t) - H_c = 22,2 - 100 × 3,8 (1,007 - 0,997) - 0 = 18,4 cm

θ = 18° ⇒ η = 1,053 × 10⁻³ Pa.s ⇒ K = 1,071 × 10⁻³

D = 1.071 × 10⁻³ √ $\frac{0.1840}{120}$ = 41.9 × 10⁻⁶m = 42μm 419, 10 m 42 m

(2) Calcul de p

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

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

V' = 1000 cm³ = 10⁻³ m³

γ_s = 26,5 kN/m³ = 26,5 × 10³ N/m³

γ_w = 10 kN/m³ = 10⁴ N/m³

m = 20 g = 20 × 10⁻³ kg = 0,2 N

$$p = \frac{10^{-3}}{0.2} \times \frac{26.5 \times 10^3 \times 10^4}{26.5 \times 10^3 - 0.997 \times 10^4} \times [1.007 - 0.977] = 80\%$$

6- Compte rendu : Compléter le tableau et tracer la courbe.



TP N°4 : Mesure des caractéristiques de compactage et de portance (Essais Proctor et CBR)

1- Problématique : Identifier un sol afin de le classer selon les normes.

Documents à consulter :

- ✓ Norme EN NF P 94-093 - A consulter nécessairement pour une information complète sur le sujet –
- ✓ EN NF P 94-093. 2014. Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié. Édition Afnor
- ✓ Classification des sols L.C.P.C.
- ✓ LCPC, Sétra. 1992. Guide pour la réalisation des remblais et des couches de formes. Fasc.1 et 2. Ré-édition en 2000.
- ✓ EN NF P11-300. 1992. Exécution des terrassements : Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Édition Afnor.

2- Introduction :

La teneur en eau d'un sol est un paramètre d'état fondamental et détermine son comportement. Pour réaliser un bon compactage de remblai, couche de forme ou corps de chaussée, il est nécessaire de déterminer la valeur en eau idéale du matériau permettant un compactage efficace aboutissant à la meilleure compacité.

L'essai Proctor consiste à simuler le compactage en laboratoire pour déterminer les conditions optimales de mise en œuvre du matériau sur le chantier.

L'énergie de compactage dépend de la destination de l'ouvrage. Elle est imposée par les C.C.T.P. On distingue:

☞ **L'essai Proctor normal** : Energie de compactage modérée pour remblais en terre (barrages en terre, digues, ...).

☞ **L'essai Proctor modifié** : Energie de compactage intense pour fondation de chaussées, pistes d'aérodromes, ...). Il correspond au compactage maximum que l'on peut obtenir sur les chantiers avec des engins de compactages puissants.

3- But de l'essai :

- **L'essai Proctor** a pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximum. La teneur en eau ainsi déterminée est appelée « teneur en eau **optimum Proctor** »

- Il définit un compactage type et permet de déterminer la teneur en eau, que doit contenir le sol pour que sa densité soit maximum sous l'effet d'un compactage donné. A cette densité maximum correspond un teneur en eau appelée teneur en eau optimum Proctor Wop.
- **L'essai Proctor**, mis au point par l'ingénieur Ralph R. Proctor (1933), est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire (ou non) par compactage à une énergie fixée (poids de dame, nombre de coups et dimensions normés). Le protocole de l'essai Proctor suit la norme NF P 94-093¹ (détermination des références de compactage d'un sol). Les valeurs obtenues par l'essai sont notées pour la teneur en eau optimale, et pour la masse volumique sèche optimale. Une autre référence peut être déterminée pour une énergie supérieure (notamment pour des couches de chaussées granulaires), il s'agit de l'optimum Proctor modifié (OPM).

4- Intérêt en Génie Civil

Les remblais posent à l'ingénieur routier un certain nombre de problèmes, d'où on peut citer :

- ✓ La stabilité des talus
- ✓ La résistance des talus à l'érosion.
- ✓ Le tassement.
- ✓ Et le compactage.

Le « compactage » est le procédé le plus économique toujours utilisé dans la construction des remblais pour améliorer la densité sèche du sol.

Le « compactage » est une réduction pratiquement instantanée du volume du sol dû à la réduction des vides d'air. Il ne y'a aucune expulsion d'eau ce qui différencie le compactage de la consolidation.

L'étude du compactage s'effectue à l'aide d'un damage normalisé connu sous le nom de « **l'essai Proctor** ».

5- Définitions :

***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 d'eau,
- ✓ L'amélioration des caractéristiques mécaniques : résistance à la compression et au cisaillement.

***L'essai Proctor** s'effectue généralement pour deux compactages d'intensités différentes :

***L'essai Proctor Normal** : est réalisé avec la dame normale (petite dame), le compactage n'est que moyennement poussé. Il est généralement utilisé pour les études de remblais en terre (barrages et digues). Il s'effectue en trois couches avec « **la dame Proctor normal** », l'énergie de compactage est de :

- ✓ 55 coups de dame par couche dans le moule C. B.R.
- ✓ 25 coups par couche dans le **moule Proctor normal**.

*L'essai Proctor Modifié : est réalisé avec la dame modifiée (grande dame) le compactage est beaucoup plus intense ; il correspond en principe au compactage maximum que l'on peut obtenir sur chantier avec les rouleaux à pieds de mouton ou les rouleaux à pneus lourds modernes. C'est ordinairement par l'**essai Proctor** modifié que l'on détermine les caractéristiques de compactage (teneur en eau optima, densité sèche maxima) des matériaux destinés à constituer la fondation ou le corps de chaussée des routes et des pistes d'aérodromes. Le compactage dans ce cas-là s'effectue en cinq couches successives avec « la dame **Proctor modifié** » l'énergie de compactage est de :

- ✓ 55 coups de dame par couche dans le moule **C.B.R.**
- ✓ 25 coups par couche dans le moule **Proctor**.

*Energie de compactage : L'énergie de compactage est égale à :

$E_C = \text{hauteur de chute} \times \text{poids de la dame} \times \text{Nb de coups} \times \text{Nb de couches} / \text{volume total du moule.}$

L'énergie de compactage dépend de la destination de l'ouvrage. Elle est imposée par les C.C.T.P.

On distingue :

- **L'essai Proctor normal** : Energie de compactage modérée pour remblais en terre (barrages en terre, digues, ...)
- **L'essai Proctor modifié** : Energie de compactage intense pour fondation de chaussées, pistes d'aérodromes, ...). Il correspond au compactage maximum que l'on peut obtenir sur les chantiers avec des engins de compactages puissants.

*L'optimum Proctor : est la teneur en eau **w** pour laquelle le sol atteint, pour une énergie de compactage donné, un γ_d maximal.

*Diagramme Proctor simple : C'est un diagramme qui comporte une courbe Proctor unique, donnant, pour une énergie de compactage donnée, **W_{opt}** et **γ_d Max.**

*Diagramme Proctor complet : En faisant varier le nombre de coups par couche, on peut déterminer plusieurs courbes Proctor simple, correspondantes à diverses énergies de compactage. Les courbes trouvées sont toutes tangentes asymptotiquement à une hyperbole équilatère, qui correspond à un sol ne contenant plus d'air du tout.

* γ_d : Poids volumique apparent sec ;

* γ : Poids volumique apparent ;

*WW % : Teneur en eau ;

*V_a : Volume apparent du moule ;

*W_{OPN} (ou W_{OPM}) : teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal (ou Modifié) ;

* γ_{dOPN} (ou γ_{dOPM}) : poids volumique apparent sec à l'Optimum Proctor Normal (ou Modifié).

6- Principe :

L'ingénieur américain Proctor a montré que pour une énergie de compactage donnée, la teneur en eau du matériau avait une grande influence sur la compacité obtenue. L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule normalisé (moule standard), avec une énergie de compactage normalisée (dame standard de masse normalisée tombant d'une hauteur constante selon un processus bien déterminé), un échantillon du sol à étudier sous différentes valeurs de teneur en eau pour en déduire :

- La teneur en eau optimale.
- La densité sèche maximum correspondante.

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais dits : Essai Proctor normal ou Essai Proctor modifié.

Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée.

Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

L'**essai Proctor** est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%, 4% ,6% ,8% ,10%,12% ,14%,16%). On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau. On trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux. Elle représente un maximum dont l'abscisse est « la teneur en eau **optimum Proctor** », et l'ordonnée « la densité sèche maximum **Proctor** ».

D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé.

7- Appareillage :

7 - 1- Appareillage spécifique :

L'appareillage spécifique comporte :

- Un socle de compactage constitué d'un bloc de béton présentant une surface plane horizontale d'au moins **30 cm x 30 cm** et une épaisseur d'au moins **30 cm**
- Deux modèles de moules :
 - ✓ Moule Proctor.
 - ✓ Moule CBR.

Les deux modèles sont constitués d'un corps de moule, d'une embase et d'une rehausse. Le corps de moule peut être monobloc ou fendu. Les formes et les dimensions fonctionnelles de ces éléments doivent être conformes aux indications portées sur la **figure 1**.

Le moule **CBR** comporte en plus un disque d'espacement dont la forme et les dimensions sont conformes à la **figure 1**.

- Deux modèles de dames de compactage manuelles :
 - ✓ La dame dite "dame Proctor normal" est constituée d'un mouton cylindrique de **51 mm ± 1 mm** de diamètre. Ce mouton coulisse dans un fourreau qui lui autorise une hauteur de chute de **305 mm ± 2 mm**. La masse de l'équipage mobile est de **2 490 g ± 2,5 g**. Les formes et autres dimensions fonctionnelles de cette dame doivent être conformes aux indications portées sur la **figure 1**.
 - ✓ la dame dite "dame Proctor modifié" est de conception analogue à la "dame Proctor normal" mais la hauteur de chute est de **457 mm ± 2 mm** et la masse de l'équipage mobile de **4 535 g ± 5 g**. Les

formes et autres dimensions fonctionnelles de cette dame doivent être conformes aux indications portées sur la **figure 1**.

- Une règle à araser constituée par une lame en acier dont les formes et les dimensions doivent être conformes aux indications portées sur la **figure 1**.
- Les machines à compacter mécanisées peuvent avantageusement être utilisées si elles répondent aux conditions suivantes :
 - 1) Les masse, diamètre, hauteur de chute du mouton, épaisseur du fourreau lorsque la machine en comporte un, sont tels que définis sur la **figure 1**.
 - 2) Le mode de répartition des coups est respecté.
 - 3) La cinématique du mécanisme permet au porte-moule d'être en appui direct sur le bâti de la machine au moment de l'impact de la dame, si ce n'est pas le cas, il convient de vérifier pour chaque matériau que les écarts de mesure de la masse volumique maximale entre la machine et le mode manuel n'excèdent pas **1%**.
 - 4) La machine est rendue solidaire d'un socle en béton dont l'épaisseur minimale est de **30 cm**.

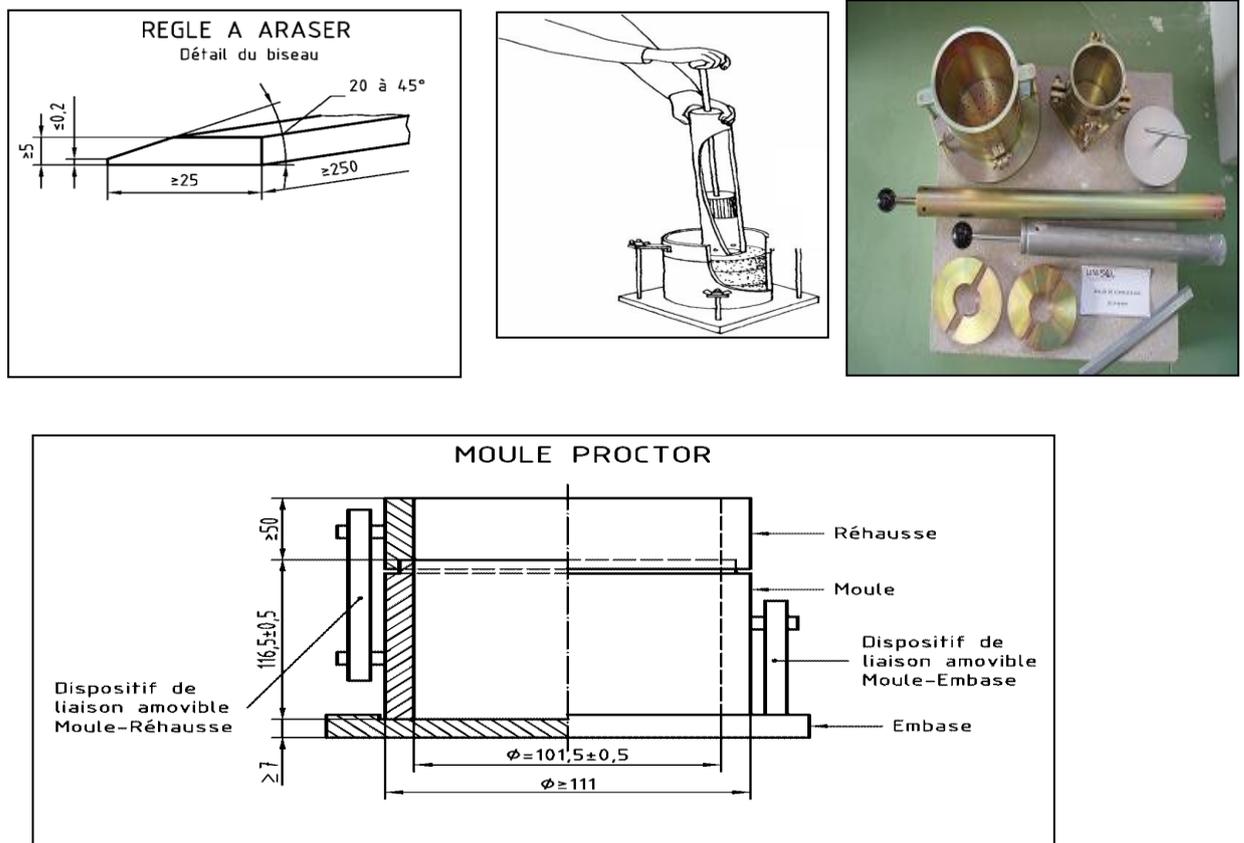


Figure1. a) Appareillage spécifique et indications à respecter

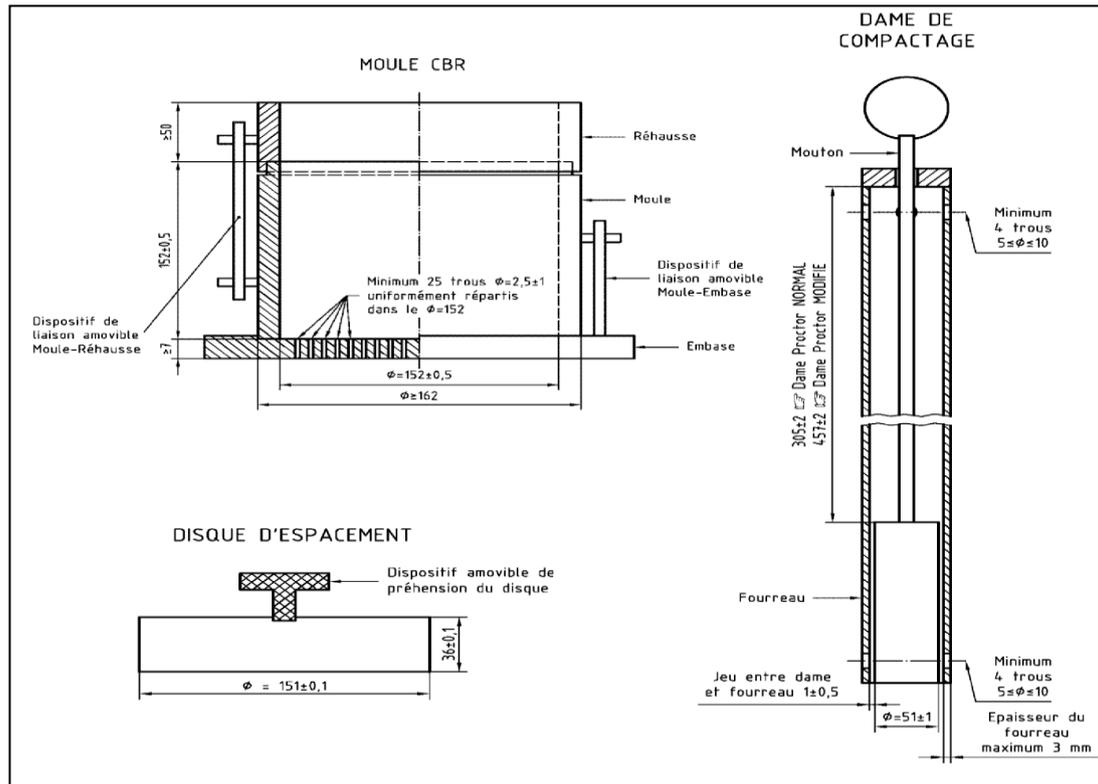


Figure1. b) L'appareillage spécifique et indications à respecter

7- 2- Appareillage d'usage courant :

- ✓ Tamis d'ouvertures de mailles carrées de dimensions nominales **5 mm** et **20 mm**.
- ✓ Balances dont les portées maximale et minimale sont compatibles avec les masses à peser (balance sensible au gramme d'une portée maxima au moins égale à 20 kg) et telles que les pesées soient effectuées avec une incertitude de 1/1 000 de la valeur mesurée.
- ✓ Une étuve ou un appareil de séchage pour déterminer la teneur en eau des matériaux selon une méthode normalisée.
- ✓ Des récipients (ou des sacs) hermétiques permettant de conserver la teneur en eau des échantillons.
- ✓ Un pulvérisateur à eau.
- ✓ Éventuellement un malaxeur-désagrégateur mécanique dont le volume de la cuve est d'au moins 10 dm³.
- ✓ Un dispositif permettant d'extraire l'éprouvette hors du corps du moule (dans le cas d'un corps de moule monobloc). Des maillets, burins, couteaux, etc. pour le démoulage, ou mieux un appareil à démouler.
- ✓ Une règle à araser.
- ✓ Une éprouvette graduée.
- ✓ De l'eau.
- ✓ Un bac.

8- Mode opératoire :

8 - 1 - Préparation des échantillons soumis à l'essai :

8-1-1 Prise d'échantillon :

La masse totale du sol nécessaire à l'exécution d'un essai doit permettre de faire un prélèvement différent pour chaque point de la courbe Proctor, car il n'est pas autorisé de réutiliser le même sol pour la détermination de plusieurs points de la courbe Proctor. Elle varie entre **15 kg** et **100 kg** suivant la granularité du sol et suivant que l'on cherche une détermination concomitante de ses caractéristiques de compactage, de son indice **CBR** après immersion et/ou de son Indice Portant Immédiat. Le diagramme représenté sur la **figure 2** précise ces masses. Il s'agit de quantités minimales nécessaires à la détermination de la courbe Proctor en cinq points.

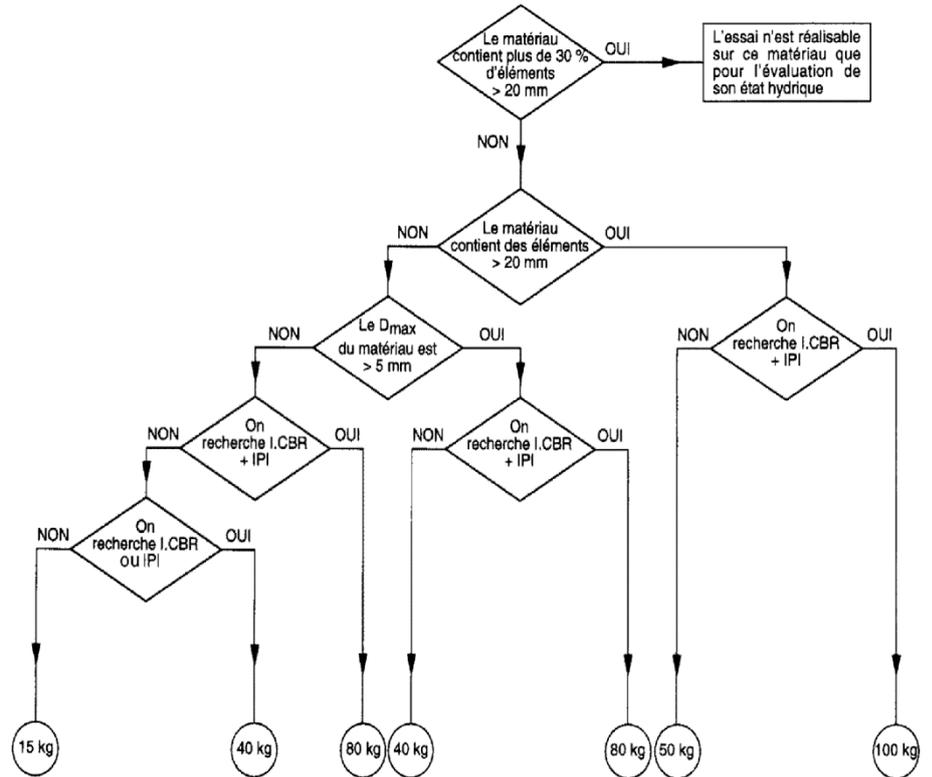


Figure 2 : Diagramme des quantités minimales de matériau sec nécessaires à l'essai.

8-1--2 Préparation des éprouvettes :

La totalité du sol prélevé est, si nécessaire, séchée à l'air ou dans une étuve réglée à **50 °c** maximum jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai.

Après séchage, le sol est tamisé à **20 mm** et seul le tamisât est conservé pour l'exécution de l'essai.

Le sol est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en au moins cinq parts égales.

Les parts sont humidifiées à une teneur en eau telle que les teneurs en eau de trois parts au moins et quatre au plus soient réparties entre : $0,8 W_{OPN}$ (ou W_{OPM}) et $1,2 W_{OPN}$ (ou W_{OPM})

Après humidification, chaque part est conservée en boîtes ou sacs hermétiques durant un temps fonction de l'argilosité du sol pour parfaire la diffusion de l'eau. C'est à partir de chacune de ces parts que seront confectionnées les éprouvettes destinées à la détermination des points de la courbe Proctor (et le cas échéant la détermination de l'Indice Portant Immédiat et l'Indice **CBR** Immédiat ou après immersion des éprouvettes aux teneurs en eau considérées).

NOTE : L'humidification de chacune des parts du sol constitue la phase la plus délicate de l'essai.

La première difficulté : est celle du choix des teneurs en eau à attribuer à chaque part étant donné que l'on ne connaît pas la W_{OPN} ou W_{OPM} du sol. L'opérateur doit donc en estimer une valeur approchée. Pour cela, il a recours à des tests tactiles et visuels et son expérience est déterminante dans la justesse de cette estimation.

À défaut d'une expérience suffisante, l'opérateur doit envisager une détermination de la courbe Proctor en plus de cinq points et préparer les quantités de sols et le nombre de parts en conséquence.

Une seconde difficulté réside dans les modalités d'incorporation de l'eau au sein du sol qui dans tous les cas doit se faire lentement, de manière bien répartie à la surface du sol et dans toute la mesure du possible à l'aide d'un pulvérisateur, en maintenant le malaxage pendant l'introduction de l'eau.

En outre, ces modalités dépendent de l'argilosité des sol :

- Dans le cas des sols sableux et graveleux, le malaxage peut se faire manuellement ou à l'aide de n'importe quel type de malaxeur. L'observation d'une durée de conservation pour homogénéisation de **15 min** en boîtes ou sacs hermétiques est suffisante.
- Dans le cas des sols limoneux et sablo-limoneux, les modes de malaxage indiqués pour les sols sableux et graveleux sont conservés mais le temps de conservation en boîtes ou sacs étanches doit être porté à **2 h** ou **3 h**
- Dans le cas des sols argileux, il convient d'abord de les réduire en une mouture **0/2** (évaluée de visu). L'exécution manuelle de cette opération est le plus souvent fastidieuse, elle peut être grandement facilitée par l'emploi d'un malaxeur-désagrégateur.

Le sol réduit est ensuite humidifié à l'aide d'un pulvérisateur, tout en maintenant le malaxage. Celui-ci peut se faire manuellement ou plus avantageusement à l'aide du malaxeur-désagrégateur.

Après introduction de l'eau et constatation visuelle d'une stabilisation du comportement du sol sous l'action du malaxage, il est introduit dans des boîtes ou sacs hermétiques et conservé entre **24 h** et **48 h** selon l'argilosité.

8-2 Choix du type de moule :

Il est imposé par la granularité du sol et l'utilisation envisagée des résultats de l'essai comme indiqué sur le diagramme (figure 3).

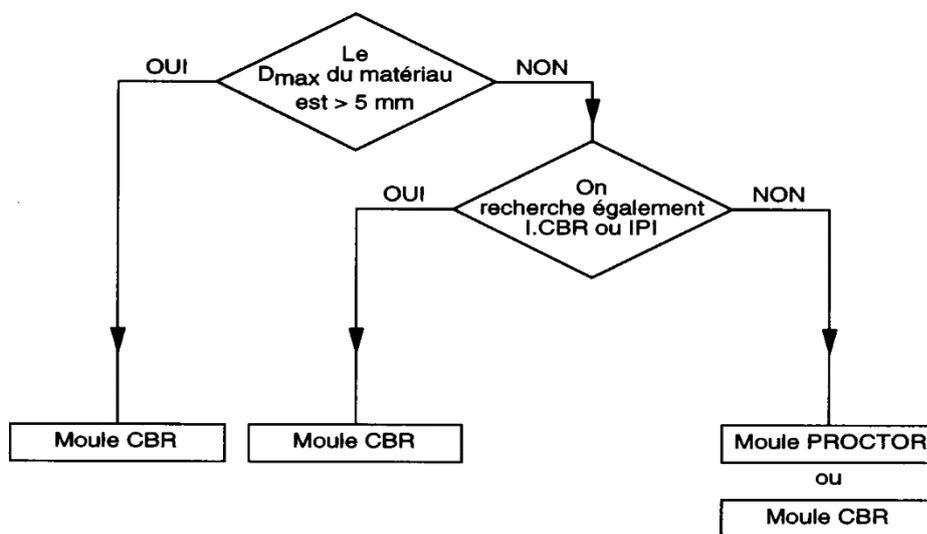
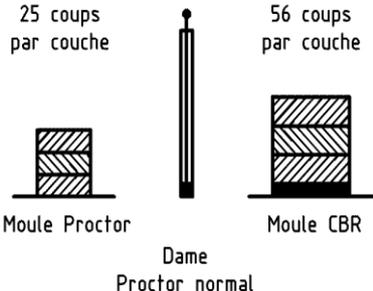
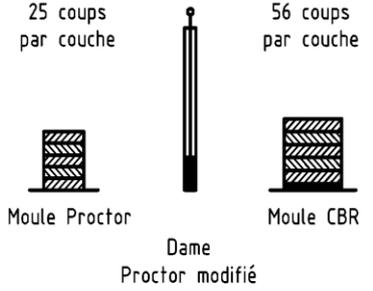


Figure 3 : Choix du type de moule.

8-3- Manipulation et mode opératoire détaillé de l'essai:

Les choix du type de moule et de la nature de l'essai à exécuter étant faits, on procède au compactage des éprouvettes humidifiées comme indiqué (Préparation des éprouvettes) en respectant les modalités indiquées dans le **tableau 1**.

Tableau 1 : Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié :

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	<p>3 couches, à raison de :</p> 
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	03	03	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	<p>5 couches, à raison de :</p> 
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	05	05	
	Nombre de coups par couche	25	56	

Avant introduction du sol dans le moule il y a lieu de :

- Solidariser, moule, embase et rehausse, lubrifier le cas échéant les parois du moule,
- Placer le disque d'espacement au fond du moule **CBR** lorsqu'il est utilisé.
- Placer éventuellement un papier-filtre ou un film plastique au fond du moule Proctor ou sur le disque d'espacement du moule **CBR** pour faciliter le démoulage.

Introduire alors la quantité de sol pour que la hauteur de la première couche après compactage soit légèrement supérieure au tiers ou au cinquième de la hauteur du moule respectivement pour l'essai Proctor normal et pour l'essai Proctor modifié.

Compacter cette couche avec la dame correspondante en appliquant respectivement **25 coups** ou **56 coups** par couche suivant le schéma suivant, et répéter l'opération autant de fois que l'exige le nombre de couches à réaliser.

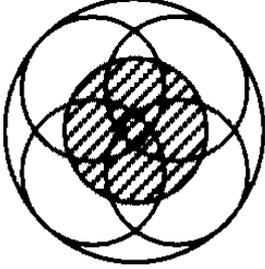
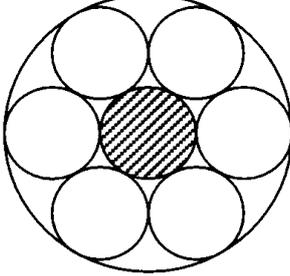
Moule Proctor	Moule CBR
	
<p>Par couche : trois séquences de huit coups répartis, et le 25^e au centre.</p>	<p>Par couche : huit séquences de sept coups, six approximativement tangents à la périphérie et le 7^e au centre.</p>

Figure 4 : Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche.

Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le sol doit alors dépasser du moule d'une hauteur d'un centimètre au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant radialement du centre vers la périphérie du moule. Si des éléments > **10 mm** sont entraînés dans cette opération, en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, combler ceux-ci avec des éléments fins qui sont lissés avec la règle à araser.

Peser l'ensemble du moule avec le sol :

- S'il n'est pas prévu de poursuivre l'essai par la détermination des Indices **CBR** et/ou de l'Indice Portant Immédiat, on procède au démoulage de l'éprouvette. En extraire, ensuite, un échantillon représentatif pour en déterminer la teneur en eau.
- Si à l'inverse, on prévoit la détermination concomitante de l'Indice Portant Immédiat, on procède immédiatement après le compactage au poinçonnement de l'éprouvette puis à son démoulage et à sa dessiccation pour mesure de sa teneur en eau
- Si on prévoit la détermination concomitante de l'Indice Portant Immédiat et de l'Indice **CBR** après immersion, il convient de compacter deux éprouvettes identiques, la première servant à la détermination de l'**IPI** et de la teneur en eau, la seconde étant mise en immersion **4 jours** puis poinçonnée conformément à la norme **NF P 94-078**.
- Enfin, si on prévoit seulement la détermination concomitante de l'Indice **CBR** après immersion, l'éprouvette est mise en immersion immédiatement après son compactage. La teneur en eau de moulage est alors déterminée avec l'excédent de matériau pré-humidifié inutilisé dans la confection de l'éprouvette.

8-4- Exécution de l'essai Proctor normal :

1. Peser 3 kg de sol sec.
2. Ajouter une quantité d'eau afin que ω 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^{ère} 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.

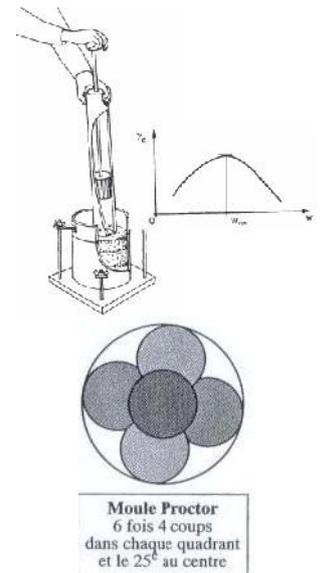


Figure 5 : Réalisation de l'essai

9- Expression des résultats :

9-1 - Teneur en eau optimale Proctor : W_{OP} :

Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :

- La teneur en eau.
- Le poids de sol sec contenu dans le moule.
- Le poids volumique du sol sec en tenant compte du volume réel du moule utilisé, déterminé à partir de mesures géométriques réalisées à **0,1 mm** près.

Tracer et compléter un tableau des calculs contenant :

N° d'essai	01 (Point 1)	02 (Point 2)	03 (Point 3)	04 (Point 4)	05 (Point 5)	06 (Point 6)
Poids du sol humide M_h (kg)						
Poids du sol sec M_s (kg)						
Teneur en eau W (%) $W\% = \frac{W_h - W_s}{W_s}$						
Volume du moule V (dm ³)						
Poids volumique γ (kg/dm ³) $\gamma = \frac{W_h}{V}$						
Poids volumique sec γ_d $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+W}$						
Teneur en eau optimale Proctor : $W_{OPM}(\%) =$						

9-II - Tracé de la courbe Proctor :

- Reporter les couples (W, γ_d) c-à-d les divers pourcentages des teneur en eau et les valeurs des poids volumiques du sol sec et correspondantes du tableau du document réponse N°1 sur un graphique $\gamma_d = f(W \%)$ tel que celui présenté sur le quadrillage semi-logarithmique du document réponse N°2 ci-dessous.

-Tracer ensuite la courbe ajustée sur les points expérimentaux obtenus :

- en abscisse : les pourcentages des teneur en eau.
- En ordonnée : les valeurs des Poids Volumique apparent sec.
- La courbe doit être tracée de manière continue.

- Tirer et déduire les valeurs de la densité sec maximum γ_{dmax} correspondant à une teneur en eau

$W_{optimum\ proctor}$, c-à-d déterminer le couple (ω, γ_d) à l'optimum.

10- Compte rendu :

Il vous est demandé de :

1. Réaliser les essais.
2. Dresser le tableau des résultats pour chaque point effectué. Compléter le tableau des calculs en vous aidant du document réponse N°1.
3. Tracer la courbe Proctor en vous aidant du document réponse N°2.
4. Déterminer la teneur en eau optimale Proctor : $W_{OPM}(\%)$.
5. Déterminer la valeur du poids volumique sec maximum γ_{dmax} correspondant à la teneur en eau woptimum proctor.
6. Déterminer le couple (ω, γ_d) à l'optimum.
7. Commenter vos résultats

Document réponse N°1

I - calcul de la teneur en eau optimale Proctor : WOP :

Pour chaque éprouvette compactée , calculer :

- La teneur en eau.
- Le poids de sol sec contenu dans le moule.
- Le poids volumique du sol sec en tenant compte du volume réel du moule utilisé, déterminé à partir de mesures géométriques réalisées à **0,1 mm** près.

Compléter le tableau des calculs suivant:

N° d'essai	01 (Point 1)	02 (Point 2)	03 (Point 3)	04 (Point 4)	05 (Point 5)	06 (Point 6)
Poids du sol humide Mh (kg)	4.001	4.298	4.799	4.977	4.871	4.404
Poids du sol sec Ms (kg)	3.859	4.112	4.511	4.573	4.426	3.944
Teneur en eau W (%) $W\% = \frac{W_h - W_s}{W_s}$						
Volume du moule V (dm ³)	2.297	2.297	2.297	2.297	2.297	2.297
Poids volumique γ (kg/dm ³) $\gamma = \frac{W_h}{V}$						
Poids volumique sec γ_d $\gamma_d = \frac{\gamma}{1+W}$						
Teneur en eau optimale Proctor : W _{OPM} (%) =						

Document réponse N°2

II - Tracé de la courbe Proctor:

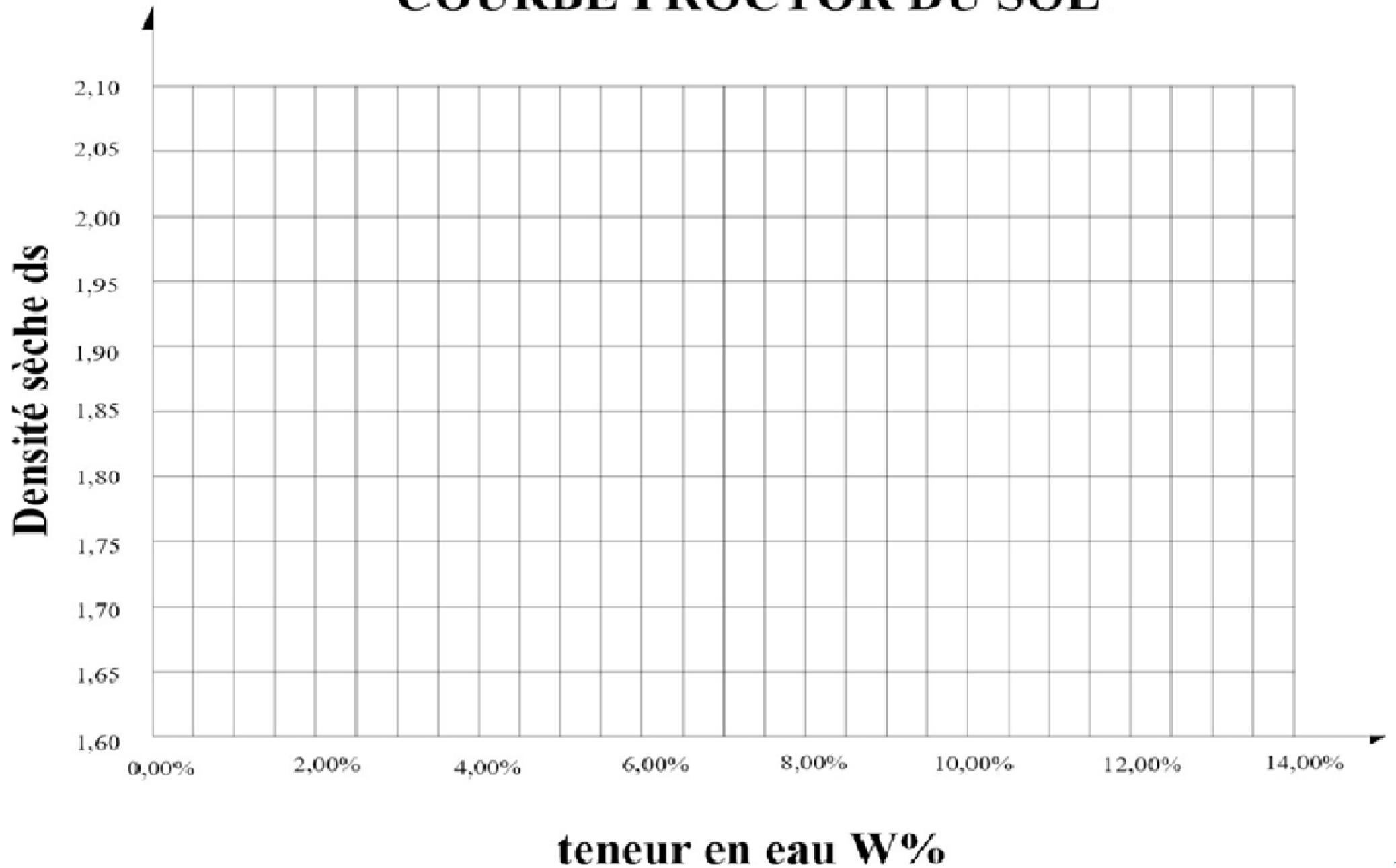
Reporter les couples (w, γ_d) c-à-d les divers pourcentages des teneur en eau et les valeurs des poids volumiques du sol sec et correspondantes du tableau du document réponse N°1 sur un graphique $\gamma_d = f(w\%)$ tel que celui présenté sur le quadrillage semi-logarithmique du document réponse N°2 ci-dessous.

-Tracer ensuite la courbe ajustée sur les points expérimentaux obtenus :

- en abscisse : les pourcentages des teneur en eau.
- En ordonnée : les valeurs des Poids Volumique apparent sec.
- La courbe doit être tracée de manière continue.

Tracer la courbe granulométrique et déduire les valeurs de la densité sec maximum γ_{dmax} correspondant à une teneur en eau.

COURBE PROCTOR DU SOL



TP N°:5 Mesure de la densité in-situ (essai au densitomètre à membrane)



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche Scientifique
Faculté des Sciences et de la Technologie et Sciences de la Matière
Département des Génie Civil



TP N°5: Mesure de la masse volumique sèche in situ

1- Problématique : Identifier un sol afin de le classer selon les normes.

Documents à consulter :

- ✓ Norme EN NF 933-1(Sols : reconnaissance et essais.
- ✓ Classification des sols L.C.P.C.

2- Introduction :

L'identification des sols nécessite d'effectuer des essais de reconnaissance au laboratoire et in-situ, parmi ces essais la mesure de la masse volumique sèche in situ , pour la détermination de la masse volumique des particules solide. La masse volumique du sol et la teneur en eau, sont deux paramètres qui permettent de déterminer l'indice des vides, la porosité, le degré de saturation et la masse volumique du sol sec.

3- But de l'essai :

La détermination de la masse volumique sèche du sol in situ.

4- Intérêt en Génie Civil

La masse volumique sèche d'un sol est un paramètre d'état fondamental et détermine son comportement.

Pour réaliser un bon compactage de remblai, couche de forme ou corps de chaussée, il est nécessaire de déterminer la valeur en eau idéale du matériau permettant un compactage efficace aboutissant à la meilleure compacité.

5- Principe :

5.1 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.

TP N°:5 Mesure de la densité in-situ (essai au densitomètre à membrane)

5.2 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.

6- Appareillage :

- ✓ Un densitomètre à membrane.
- ✓ Un marteau.
- ✓ Un carottier
- ✓ Boite de pétri;
- ✓ Balance de précision 1/100 de gramme ;
- ✓ Étuve ;
- ✓ Spatule ;
- ✓ Une spatule est un outil permettant de prélever une quantité de matière

7- Mode opératoire :

7-1- 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 cm³ 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.



Figure1. L'appareillage et réalisation de l'essai

TP N°:5 Mesure de la densité in-situ (essai au densitomètre à membrane)

7-2- 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 m₁**.
5. Vider le carottier du matériau et peser le : **masse m₂**.
6. A l'aide d'un pied à coulisse, déterminer les dimensions du carottier.

8- Expression des résultats :

8 - 1 - Densitomètre à membrane :

- 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 :

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

8 - 2 - Carottier :

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

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V_c} \quad \text{Avec } V_c : \text{Volume du carottier}$$

- La masse volumique sèche du sol est donnée par :

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

9 Compte rendu :

Il vous est demandé de :

1. Réaliser les deux essais.
2. Dresser le tableau des résultats. Compléter le tableau des calculs.
3. Déterminer la masse volumique par les deux méthodes (densitomètre et carottiers).
4. Comparer entre les résultats des deux méthodes (densitomètre et carottiers).
5. Commenter vos résultats.

TP N°:5 Mesure de la densité in-situ (essai au densitomètre à membrane)

Compte rendu :

Il vous est demandé de :

1. Réaliser les deux essais.
2. Dresser le tableau des résultats. Compléter le tableau des calculs en vous aidant du document réponse N°1.
3. Déterminer la masse volumique et la masse volumique sèche par la méthode du densitomètre.
4. Commenter vos résultats.

Document réponse N°1

I – Détermination de la masse volumique et la masse volumique sèche par la méthode du densitomètre :

Compléter le tableau des calculs suivant :

$V_0 (cm^3)$		160(cm^3)
$V_1 (cm^3)$		1275(cm^3)
Volume du trou $V_1 = V_1 - V_0 (cm^3)$		
Masse du sol extrait du trou M (g)		2158 (g)
$W(\%)$	Masse de la Tare (g)	17.59 (g)
	Masse de : la Tare + le sol humide M_h (g)	43.21 (g)
	Masse de : la Tare + le sol sec M_s (g)	42.45 (g)
	$W(\%)$ $W\% = \frac{W_h - W_s}{W_s}$	
$\rho = \frac{M}{V}$ (g/ cm^3)		
$\rho_d = \frac{\rho}{1+W}$ (g/ cm^3)		

Références Bibliographiques

1. Costet et Sanglerat, "Cours pratiques de mécanique des sols", Dunod – Paris.
2. Caquot et Kerisel, "Traité de mécanique des sols", Gauthier, Villars – Paris.
3. Norme NF EN 933-1 (Sols : reconnaissance et essais)
4. Norme NF P 94 051 (Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau).
5. Norme NF P 94-093.
6. NF P 94-093. 2014. Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié. Édition Afnor
7. LCPC, Sétra. 1992. Guide pour la réalisation des remblais et des couches de formes. Fasc.1 et 2. Ré-édition en 2000.
8. NF P11-300. 1992. Exécution des terrassements : Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Édition Afnor.
9. Classification des sols L.C.P.C.