

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

Cours: Travaux Pratiques de Mécanique des Sols I et II

***2^{ème} et 3^{ème} Année Licence
Génie Civil et Travaux Publics***

Elaboré par:

Pr. KRIM Abdallah

Experts:

Pr. DRAICHE Kada

Pr. CHIKH Abdelbaki

Année universitaire: 2023-2024

AVANT-PROPOS

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

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

La géotechnique routière a pour objectif de définir les caractéristiques des sols qui serviront d'assise pour la structure de chaussée. Elle étudie les problèmes d'équilibre et de formation des masses de terre de différentes natures soumises à l'effet des efforts extérieurs, appliquées, aussi bien au sol que l'on rencontre dans la nature et qui supporte la construction d'une route et aux massifs de terres artificielles (remblai). Cette étude doit d'abord permettre de localiser les différentes couches et de donner les caractéristiques mécaniques et physiques de ce sol. Pour cela, on fait des essais en laboratoire pour permettre de déterminer les caractéristiques in situ.

Ce polycopié est adressé aux étudiants de plusieurs spécialités telles que le génie civil, le bâtiment et les travaux publics, et se propose de présenter les essais de mécanique des sols I et II en estimant pouvoir contribuer modestement à l'introduction de cette discipline aux ingénieurs.

Table des matières

1. Informations sur le cours et introduction générale

1.1. Informations sur le cours.....	1
1.2. Introduction générale sur cours.....	1
1.3. Contenu.....	2
1.4. Pré-requis	3
1.5. Visée d'apprentissage	4
1.6. Modalité d'évaluation des apprentissages.....	5
1.7. Activités d'enseignement-apprentissage.....	6
1.8. Alignement pédagogique	6
1.9. Modalité de fonctionnement	7

2. TP 1; Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau)

2.1. Objectifs de TP	8
2.2. Masse volumique	8
2.2.1. Définitions.....	8
2.2.2. Détermination de la masse volumique des grains solides d'un sol en utilisant la méthode du pycnomètre à eau	9
2.2.2.1. Principe de l'essai	9
2.2.2.2. Équipements nécessaires.....	9
2.2.2.3. Préparation de l'échantillon et matériels.....	10
2.2.2.4. Mode opératoire	11
2.3. Mesure de la teneur en eau par la méthode de la poêle à frire	11
2.3.1. Définitions.....	11
2.3.2. Principe de la détermination de la teneur en eau.....	11
2.3.3. Équipements nécessaires.....	11
2.3.3. Mode opératoire	12
2.4. Travail demandé.....	12
2.5. Feuille d'essai- Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau)	12
2.6. Exemple d'essai- Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau)	13

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

3.1 Objectifs de TP	15
3.2. Pre-requis	15
3.3. Définitions et principe de l'essai	15
3.3.1. Consistance des sols fins.....	16
3.3.2. Limites d'Atterberg	16
3.3.3. Indices de plasticité et de liquidité	17
2.3.3.1. Indice de plasticité (I_p en %)	17
2.3.3.2. Indice de liquidité (I_l en %)	17
2.3.3.3. Indice de consistance (I_c en %)	17
3.4. Diagramme de plasticité – abaque de casagrande.....	18
3.5. Détermination de la limite de liquidité	19
3.5.1 Équipements nécessaires	19
3.5.1.1 Appareillage spécifique (pour la détermination de la limite de liquidité	19
3.5.1.2. Appareillage d'usage courant	19
3.5.2. Préparation de l'échantillon	21
3.5.3. Mode opératoire	21
3.5.3.1. Réglage de la hauteur de chute	21
3.5.3.2. Exécution des essais.....	21
3.5.4. Expression des résultats	22
3.6. Limite de plasticité.....	23
3.6.1 Équipements nécessaires.....	23
3.6.2. Mode opératoire	24
3.6.3. Expression des résultats	25
3.7. Travail demandé	25
3.8. Feuille d'essai-Limites d'atterberg.....	26
3.9. Exemple d'essai-Limites d'atterberg.....	27

4. TP 3 : Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)

4.1. Objectifs de TP	30
4.2. Définitions	30
4.3. Analyse granulométrique par tamisage.....	30

4.3.1. Principe de l'essai	30
4.3.2. Définitions	31
4.3.3. Équipements nécessaires.....	32
4.3.4. Mode opératoire	32
4.3.5. Expression des résultats	33
4.3.6. Travail demandé.....	34
4.4. Analyse granulométrique par sédimentométrie	34
4.4.1. Principe de l'essai	34
4.4.2. Définition	34
4.4.3. Équipement nécessaire	36
4.4.5. Mode opératoire	36
4.4.5.1 Préparation de la prise d'essai	36
4.4.5.2 Exécution de l'essai	37
4.4.6. Expression des résultats	38
4.4.6.1. Calcul du pourcentage d'éléments inférieurs ou égaux à D	38
4.4.6.2. Calcul du diamètre équivalent D.....	38
4.4.7. Travail demandé.....	40
4.5. Feuille d'essai-Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)	40
4.6. Exemple d'essai-Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)	42

5. TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage et de portance (essais Proctor et CBR)

5.1. Objectifs de TP	46
5.2. Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié	46
5.2.1. Définitions et principe de l'essai	46
5.2.3. Équipements nécessaires.....	47
5.2.3.1. Appareillage spécifiques	47
5.2.3.2 Appareillage d'usage courant.....	48
5.2.4. Préparation des échantillons soumis à l'essai	51
5.2.4.1. Prise d'échantillon	51
5.2.4.2. Préparation des éprouvettes	52
5.2.5. Mode opératoire	52
5.2.5.1. Choix du type de moule	52

5.2.5.2. Exécution de l'essai	54
5.2.6. Expression des résultats	55
5.3 Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.....	56
5.3.1 Définitions et principe de l'essai	56
5.3.2. Équipements nécessaires	56
5.3.2.1. Matériel de confection des éprouvettes.....	57
5.3.2.2. Matériel de poinçonnement	57
5.3.2.3. Matériel de mise en immersion et de mesure du gonflement.....	57
5.3.3. Exécution de l'essai	58
5.3.3.1 Confection des éprouvettes	58
5.3.3.2 Exécution du poinçonnement.....	59
5.3.4. Expression des résultats	60
5.4. Travail demandé	60
5.5. Feuille d'essai-Mesure des caractéristiques de compactage	60
5.5. Exemple d'essai-Mesure des caractéristiques de compactage	61

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

6.1. Objectifs de TP	63
6.2. Mesure de la densité sèche par le densitomètre à membrane	63
6.3. Mesure de la densité sèche par la méthode de l'excavation en pleine masse	65
6.4. Méthode sans prélèvement d'échantillon	65
6.5. Travail demandé.....	67
6.6. Feuille d'essai- Mesure de la densité in-situ (essai au densitomètre à membrane)	67
6.7. Exemple d'essai- Mesure de la densité in-situ (essai au densitomètre à membrane)	68

7. TP 6 : Détermination des masses volumiques sèches minimale et maximale des sables

($d_{\max} < 5 \text{ mm}$)

7.1. Objectifs de TP	70
7.2. Équipement nécessaire.....	70
7.4. Mode opératoire.....	70
7.4.1 Détermination de la masse volumique minimale	70

7.4.2 Détermination de la masse volumique maximale	71
7.5. Résultats	72
7.6. Travail demandé.....	73
7.7. Feuille d'essai- Détermination des masses volumiques sèches minimale et maximale des sables.....	73
7.8. Exemple d'essai- Détermination des masses volumiques sèches minimale et maximale des sables...	74

8. TP 7 : Perméabilité des sols : essai de perméabilité à charge constante ; essai de perméabilité à charge variable

8.1. Objectifs de TP	76
8.2. Définition	76
8.3. Notions.....	76
8.4. Équipements nécessaires.....	77
8.5. Essai à charge constante.....	78
8.5.1. Principe de l'essai	78
8.5.2. Mode opératoire	78
8.6. Essai à charge variable.....	79
8.6.1. Principe de l'essai	79
8.6.2. Mode opératoire	79
8.7. Standardiser les valeurs mesurées de k.....	80
8.8. Travail demandé	81
8.9. Feuille d'essai- Détermination de la perméabilité d'un sable	81
8.10. Exemple d'essai- Détermination de la perméabilité d'un sable.....	82

9. TP 8 : Essai de compressibilité à l'œdomètre

9.1. Objectifs de TP	84
9.2. Introduction.....	84
2.3 Principe de l'œdomètre	84
2.4. Dispositif et équipement nécessaire	85
9.5. Préparation de l'échantillon	86
9.6. Mode opératoire	86
9.7. Traitement des résultats	88

9.8. Travail demandé.....	89
9.9. Feuille d'essai- Essai de compressibilité à l'œdomètre	90
9.10. Exemple d'essai- Essai de compressibilité à l'œdomètre	92

10. TP 9 : Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande (Selon la norme française NF P94-071-1)

10.1. Objectifs de TP	95
10.2. Introduction.....	95
10.3. Notion sur les différents types d'essais de cisaillement.....	95
10.4. Principe de l'essai	96
10.5. Dispositif.....	96
10.6. Préparation de l'échantillon	98
10.7. Mode opératoire	98
10.8. Traitement des résultats	100
10.9. Travail demandé.....	101
10.10. Feuille d'essai- Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande.....	102
10.11. Exemple d'essai- Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande	104

11. Références Bibliographiques.....108

Liste des figures

Figure 2.1 : Pycnomètre avec les équipements nécessaires	10
Figure 3.1. Limites d'état physique du sol fin en fonction de sa teneur en eau	16
Figure 3.2. Diagramme de plasticité de Casagrande.....	19
Figure 3.3. Photo et schémas de l'appareil de Casagrande pour déterminer ω_L	21
Figure 3.4 : schémas de l'échantillon préparé (AFNOR)	22
Figure 3.5 : détermination de la limite de liquidité ω_l	23
Figure 3.6 : Matériels nécessaire pour la détermination de ω_p	24
Figure 3.7: Exemple de détermination de la limite de liquidité ω_l	28
Figure 4.1 : Tamiseuse et les tamis utilisés pour l'analyse granulométrique.....	32
Figure 4.2 : Courbe granulométrique.....	34
Figure 4.3 : Densimètre pour la réalisation d'une analyse granulométrique par sédimentation	35
Figure 4.4 : Densimètre torpille.....	40
Figure 4.5 : Lecture du densimètre	40
Figure 4.6 : Caractéristiques géométriques du densimètre	40
Figure 4.7 : Courbe granulométrique.....	42
Figure 4.8 : Courbes granulométriques des matériaux utilisés	44
Figure 5.1: Essai Proctor	47
Figure 5.2: Appareillage spécifique.....	50
Figure 5.3: Diagramme des quantités minimales de matériau sec nécessaires à l'essai	51
Figure 5.4: Choix du type de moule	53
Figure 5.4: Position des coups dans le moule Proctor normal et modifié (Norme NF P 94-093	54
Figure 5.5: Procédure de l'essai du compactage.....	55
Figure 5.6: Appareillage pour essai CBR	58
Figure 5.7 : Poids volumique sec en fonction de la teneur en eau	62
Figure 6.1 : Mesure de la densité par le densitomètre à membrane	65
Figure 6.2 : Mesure de densité des déchets de surface. A gauche : excavation à la pelle. A droite : remplissage du puits excavé et étanché à l'aide d'une citerne d'eau, ADEME (2005)	65
Figure 6.3 : Sonde à neutron de profondeur (source : Campbell Pacific Nuclear)	66
Figure 6.4 : Sonde en position de mesure de la teneur en eau et de la densité de la couche superficielle du sol (source : CPN MC-3 Portaprobe)	66
Figure 6.5 : Sonde en position de mesure de la teneur en eau et de la densité dans la couche entre la source radioactive et le détecteur (source : CPN MC-3 Portaprobe)	67
Figure 7.1 : Méthode de déposition du sable utilisée pour déterminer sa masse volumique minimale	71

Figure 7.2 : Méthode de déposition du sable utilisée pour déterminer sa masse volumique maximale.....	72
Figure 8.1 : Dispositif du perméamètre	78
Figure 8.2 : Principe du perméamètre : (a) essai à charge constante; (b) essai à charge variable.....	81
Figure 8.3 : Relation entre la viscosité dynamique de l'eau et la température (basé sur les données de Kaye et Laby, 1973, figure à partir de Head et Epps, 2011	81
Figure 9.1 : Principe de l'œdomètre	85
Figure 9.2 : Dispositif de l'œdomètre.....	86
Figure 9.3 : Courbe de consolidation.....	89
Figure 9.4 : Courbe de compressibilité.....	90
Figure 9.5 : Courbe de compressibilité de l'essai réalisé.....	92
Figure 9.5 : Courbe de compressibilité de l'essai du l'exemple	94
Figure 10.1 : Principe de l'essai de cisaillement.....	96
Figure 10.2 : Dispositif de l'essai de cisaillement direct	97
Figure 10.3: Accessoires de la boîte de cisaillement	98
Figure 10.4 : Courbe de Consolidation.....	101
Figure 10.5 : Résultats typiques d'un essai de cisaillement direct sur un sable : (a) τ - δl ; (b) δh - δl	101
Figure 10.6 : Paramètres de résistance au cisaillement (ϕ et C)	102
Figure 10.7 : Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal.....	106
Figure 10.8 : Caractéristiques mécaniques (ϕ et C).....	107

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Résumé de l'ensemble des évaluations envisagées pendant le semestre	5
Tableau 2.1 : Résultats de la masse volumique des grains solides	13
Tableau 2.2 : Résultats de la teneur en eau	13
Tableau 2.3 : Exemple de résultats de la masse volumique des grains solides	14
Tableau 2.4 : Exemple de résultats de la teneur en eau	14
Tableau 3.1. Marges de consistance des sols argileux	18
Tableau 3.2 : Résultats de la limite de liquidité	26
Tableau 3.3: Résultats de la limite de plasticité	27
Tableau 3.4 : Exemple de résultats de la limite de liquidité	28
Tableau 3.5: Exemple de résultats de la limite de plasticité	29
Tableau 4.1: Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage	41
Tableau 4.2: Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie	41
Tableau 4.3: Exemple de résultats de l'analyse granulométrique par tamisage	43
Tableau 4.4: Exemple de résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie	43
Tableau 4.5: Caractéristiques granulométrique des matériaux utilisés	45
Tableau 5.1: Modalité d'exécution des essais Proctor normal et modifié norme (NF P 94-093)	53
Tableau 5.2 : Résultats de l'essai de compactage	61
Tableau 5.3: Exemple de résultats de l'essai de compactage	61
Tableau 6.1 : Résultats de l'essai au densitomètre à membrane	68
Tableau 6.2 : Exemple de résultats de l'essai au densitomètre à membrane	68
Tableau 7.1 : Résultats de l'indice des vides maximal	73
Tableau 7.2 : Résultats de l'indice des vides minimal	74
Tableau 7.3 : Exemple de résultats de l'indice des vides maximal	74
Tableau 7.4 : Exemple de résultats de l'indice des vides minimal	75
Tableau 8.1 : Quelques valeurs typiques de la conductivité hydraulique (Delleur, 1999)	77
Tableau 8.2 : Résultats d'un essai de perméabilité	82
Tableau 8.3 : Exemple de résultats d'un essai de perméabilité	83
Tableau 9.1 : Résultats d'un essai de compressibilité à l'œdomètre	91
Tableau 9.1 : Exemple de résultats d'un essai de compressibilité à l'œdomètre	93
Tableau 10.1 : Résultats d'un essai de cisaillement direct; $\sigma_N=100$ kPa	102
Tableau 10.2 : Résultats d'un essai de cisaillement direct; $\sigma_N=200$ kPa	103

Tableau 10.3 : Résultats d'un essai de cisaillement direct; $\sigma_N=300$ kPa	103
Tableau 10.4 : Détermination de caractéristiques mécaniques	104
Tableau 10.5 : Exemple de résultats d'un essai de cisaillement direct; $\sigma_N=100$ kPa	104
Tableau 10.6 : Exemple de résultats d'un essai de cisaillement direct; $\sigma_N=200$ kPa	105
Tableau 10.7 : Exemple de résultats d'un essai de cisaillement direct; $\sigma_N=300$ kPa	105
Tableau 10.8 : Exemple de détermination de caractéristiques mécaniques.	107

1. Informations sur le cours et introduction générale

1.1 Informations sur le cours

Faculté: Sciences Appliquées

Département : Génie Civil

Public ciblé:

2^{ème} année licence (semestre 4) et 3^{ème} année licence (semestre 5) en Génie Civil et Travaux Publics.

Intitulé du cours: Travaux pratiques de Mécanique des sols I et II

1.2. Introduction générale sur cours

Ce cours se base sur:

- L'étude des propriétés physiques et leurs ordres de grandeur: (Densité, les différents poids volumiques sous différentes conditions, les différents types d'indice des vides, la teneur en eau, le degré de saturation, la porosité etc...).
- La classification des sols a pour objectif de regrouper les sols en des catégories ayant des caractéristiques identiques ou rapprochées. Elle comporte les essais d'identification au laboratoire tels que: l'analyse granulométrique (par tamisage et par sédimentométrie), le poids volumique des grains solides (Essai de pycnomètre), essai des limites d'Atterberg, les indices des vides maximal et minimal ($e_{\max}$ et $e_{\min}$) et l'étude du compactage des sols.
- La perméabilité des sols à charge constante et à charge variable.
- La compressibilité des sols (Essai oedométrique, commence par décrire le phénomène de consolidation à travers des exemples.

- Et enfin l'étude de la résistance au cisaillement du sol (qui a pour objectif de présenter les notions de base de la résistance du sol sous les charges provenant d'un ouvrage).

Ce cours intitulé « TPs Mécaniques des sols » permet de doter les étudiants par des connaissances sur les différents sols, ainsi que la maîtrise d'utilisation les différents équipements utilisés, pour la réalisation des essais au laboratoire afin de permettre les utiliser et les maîtriser dans le domaine de génie civil.

1.3. Contenu

Le cours est scindé en un ensemble des travaux pratiques qui permettent d'acquérir des connaissances de base sur la mécanique des sols suivant des travaux pratiques réalisés au laboratoire.

Pour la deuxième année Génie civil (semestre 4)

a. Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau)

Ce TP donne un aperçu sur la caractérisation des sols en termes de l'indice des vides maximum et minimum, de la teneur en eau, de poids volumique des grains solides, et des notions comment calculer les différents poids volumiques secs, humides et saturés.

b. Mesure des paramètres de consistance (Limites d'atterberg)

Cet essai permet de délimiter les trois états physiques : liquide, solide et plastique par des teneurs en eau limites.

c. Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)

Ce TP donne un aperçu sur la distribution dimensionnelle des grains du sol. Elle comporte deux essais :

- Analyse granulométrique par tamisage.
- Analyse granulométrique par sédimentométrie.

d. Mesure des caractéristiques de compactage et de portance (essais Proctor et CBR)

Dans certains projets géotechniques, on exige le maximum de compacité pour le sol, ce qui nécessite la détermination expérimentale de la densité sèche maximale et la teneur en eau qui correspond.

e. Mesure de la densité in-situ (essai au densitomètre à membrane)

Le but de ce TP est la détermination par un procédé rapide, la densité du sol sur place. Pour cela on va utiliser le densitomètre au cône de sable.

Pour la troisième année Génie civil (semestre 5)

f. Détermination des masses volumiques sèches minimale et maximale des sables
($d_{\max} < 5 \text{ mm}$)

- Apprendre les étapes à suivre pour déterminer les masses volumiques sèches minimale et maximale des sables ($d_{\max} < 5 \text{ mm}$).
- Déterminer les masses volumiques sèches minimale et maximale d'un sable dont le diamètre maximal des grains est inférieur à 2 mm.
- Dédire l'indice des vides minimal et maximal du sable

Remarque : Ce TP n'existe pas dans le programme, mais nous l'avons ajouté car nous en avons besoin dans les prochaines leçons.

g. perméabilité des sols

- Perméabilité à charge constante : cet essai est utilisé pour les graviers et les sables.
- Perméabilité à charge variable : pour les sols fins.

h. Essai de compressibilité à l'œdomètre

- Quelques notions sur l'évolution du tassement dans le temps, et sur l'histoire des contraintes dans le sol,
- Étude de la compressibilité au laboratoire et la détermination des paramètres de compressibilités.

i. Essai de cisaillement direct à la boîte de Casgrande

A pour objectif de déterminer les caractéristiques mécaniques (l'angle de frottement et la cohésion) directement sur des échantillons intacts ou bien mener des essais à différentes densités.

1.4. Pré-Requis

Pour pouvoir suivre ce module, l'étudiant a besoin d'avoir des notions et des connaissances sur la mécanique des sols 1 et la mécanique des sols 2, et il doit avoir la motivation et l'envie

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

de comprendre et d'apprendre de faire les essais préalablement motionnés, au laboratoire et de connaître leurs utilisations dans le domaine de génie civil.

1.5. Visées d'apprentissage

Les compétences visées par ce cours est que les étudiants doivent être capable de :

En termes de connaissances :

1. Connaître les différents types sols : (Roches, Graviers, Sables, Limons, Marnes et Argiles) ;
2. Prendre un aperçu sur le travail expérimental « essai » au laboratoire ;
3. Connaître les différents équipements qui sont utilisés pour la réalisation de chaque essai ;

En termes de savoir-faire :

1. Appliquer les formules précises pour calculer les différentes propriétés physiques des sols;
2. Déterminer les propriétés physiques des sols utilisés ;
3. Déterminer les masses volumiques du sable;
4. Faire une analyse granulométrique du sable et du gravier ;
5. Dédurre les caractéristiques granulométriques des sols et faire leurs classifications ;
6. Délimiter les trois états physiques des sols : liquide, solide et plastique par des teneurs en eau limites.
7. Déterminer expérimentalement la densité sèche maximale et la teneur en eau qui correspond.
- 8.
9. Apprendre à calculer le coefficient de perméabilité pour les deux cas : charge constante et charge variable.
10. Dédurre graphiquement les paramètres de compressibilité après avoir établir les courbes de consolidations et celles de compressibilité.
11. Tracer les courbes $\tau - \delta l$, $\delta h - \delta l$ et puis la droite de Coulomb.
12. Déterminer les paramètres de résistance au cisaillement (ϕ et C) pour chaque critère de rupture (au pic et à l'état final)

En termes de savoir-être :

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

1. Sensibiliser et motiver les étudiants à manipuler les différents appareils suivants leurs mode opératoire ;
2. Respecter la réalisation des comptes rendus pour chaque TP.

1.6. Modalités d'évaluation des apprentissages

L'évaluation finale de ce module est comptée sur l'évaluation continue et régulière (100%) de la note finale. Donc l'enseignant divise cette note sur 3 parties :

- a. **Les comptes rendus** : qui portent sur tout ce que les étudiants ont vu dans ces travaux pratiques pendant le semestre. Qui seront prévues chaque semaine à la fin de TP et qui compte sur (50%) de note finale :
- b. **Test** : est un test oral qui se base sur des questions posées sur toutes les connaissances appendues par les étudiants suivant leurs travaux pratiques pendant le semestre et qui compte sur (25%) de note finale.
- c. **Note d'assiduité et de présence** : cette note est basée sur la présence, l'assiduité et la participation des étudiants au cours de semestre et qui compte sur (25%) de note finale.

Tableau 1.1 : résumé de l'ensemble des évaluations envisagées pendant le semestre.

Type d'évaluation	Période de l'évaluation	Modalité de l'évaluation		Objectifs de l'évaluation
Diagnostic	Au début du TP	test des pré-requis	Questions orales.	Pour tester les connaissances préalables permettant le bon suivi du cours et pour une orientation en cas d'échec.
Formative	Pendant le semestre	Activités d'apprentissage	Explication de déroulements des essais	Pour donner les connaissances nécessaires sur chaque travail pratique.
			Réalisation des essais	Pour permettre la mise en relation entre les connaissances acquises et leurs applications.
Certificative	A la fin de semestre	Tests	Questions orales	Pour tester les connaissances acquises nécessaires au bon

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

				des travaux pratiques réalisés au laboratoire par les étudiants.
--	--	--	--	---

La note finale du TP est calculée par la formule :

Note TP= (Compte rendu+ Test+ Note d'assiduité)

NB : La note finale qui assurera la réussite de ce cours doit être supérieure ou égale à 10

1.7. Activités d'enseignement-apprentissage

Les activités d'enseignement-apprentissage de ce cours est basée beaucoup plus sur le présentiel qui compte sur :

1. Les savoirs et les connaissances sont transmis à travers le cours, au même temps l'enseignant doit insister sur des rappels essentiels du chapitre et le simplifier le maximum possible pour aller directement au but. A leurs tours les étudiants doivent prendre des notes qui servir à maîtriser les concepts indispensables à la réalisation des travaux pratiques de la mécanique des sols pendant la séance ;
2. Les étudiants sont invités à participer à des débats, initiés par des questions posées pendant la séance de TP dans le but de développer des échanges entre eux ;
3. Les étudiants sont invités à participer librement à ces débats en proposant des réponses aux questions posées afin de mobiliser leurs connaissances sur le comportement des sols;
4. Des comptes rendus sont demandés aux étudiants durant le semestre chaque semaine dans le but de vérifier leurs capacités à mobiliser les savoirs dans la réalisation des essais.

1.8. Alignement pédagogique

La compétence visée repose sur les trois piliers : savoir ; savoir-faire et savoir être :

- La méthode d'apprentissage par transmission est la méthode la plus efficace pour que les étudiants puissent emmagasiner des connaissances sur le comportement des sols. L'enseignant doit tester les connaissances et la compréhension des étudiants sur l'utilité de ces essais dans le domaine de génie civil en général.
- Les étudiants doivent être capables de maîtriser l'utilisation des matériels.

- Les étudiants sont invités à respecter et à être motivés à utiliser les différents appareils suivant leur mode opératoire et réaliser des comptes rendus pour chaque TP.

1.9. Modalités de fonctionnement

Le cours est organisé en :

1. Une partie de chaque séance est théorique. Elle se base sur la transmission des définitions de bases et les méthodes de travail à suivre pour l'élaboration de ces travaux pratiques ;
2. Des séances de travaux pratiques qui permettent l'utilisation des équipements au laboratoire pour mieux servir et réaliser les essais sur les sols ;
3. Le déroulement de ces TPs est assuré aux laboratoires dans le but d'apprentissage transmissive des connaissances sur les sols suivant des essais réalisés par des normes précises.

2. TP 1; Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau)

2.1. Objectifs de TP

1. Connaître les différents types de masses volumiques.
2. Apprendre les étapes à suivre pour déterminer la masse volumique des grains solides des sols en utilisant la méthode du pycnomètre à eau.
3. Déterminer la masse volumique d'un sable.
4. Déterminer la teneur en eau des sols.

2.2. Masse volumique

2.2.1. Définitions

- **Masse volumique des grains solides (ρ_s)** : elle est définie comme le rapport entre la masse des grains solides secs et leur volume, où le volume comprend tous les vides scellés contenus dans les particules solides.

$$\rho_s = m_s / V_s \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

- **Masse volumique de l'eau** : elle donnée par la formule suivante

$$\rho_w = m_w / V_w \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$$\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$$

Suivant son état, le sol peut être caractérisé par différentes autres masses volumiques :

- Sol sec ($S_r = 0\%$)

- **Masse volumique apparente sèche (ρ_d)** : C'est la masse des particules solides sèches, après séchage à 105°C, contenues dans l'unité de volume.

$$\rho_d = m_s / V_t \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

- Sol partiellement saturé ($0\% < S_r < 100\%$)

- **Masse volumique apparente humide (ρ ou ρ_h)** : C'est la somme des masses des particules solides et de l'eau contenues dans l'unité de volume de sol.

$$\rho = m_t / V_t \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

- Sol complètement saturé ($S_r = 100\%$)

- **Masse volumique apparente saturée (ρ_{sat}):** elle correspond à la masse d'un volume unitaire de sol dont tous les vides sont occupés par de l'eau.

- Sol immergé dans l'eau

- **Masse volumique déjaugé :** elle est donnée comme suit

$$\rho' = \rho_{sat} - \rho_w \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

2.2.2. Détermination de la masse volumique des grains solides d'un sol en utilisant la méthode du pycnomètre à eau

- Cette méthode s'applique à tout échantillon de sol dont le diamètre maximal (d_{max}) des grains solides est inférieur à 2 mm.
- L'essai détermine la masse volumique moyenne d'un échantillon composé de particules, parfois de nature différente.
- La masse volumique des particules solides d'un sol est utilisée pour connaître l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité.

2.2.2.1 Principe de l'essai

La masse des particules solides est obtenue par pesage. Le volume est mesuré au pycnomètre. L'échantillon de sol est séché à l'étuve puis pesé. Le volume des particules est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides.

2.2.2.2. Équipements nécessaires

- Pycnomètre muni d'un bouchon ;
- Eau distillée
- Une balance dont les portées minimale et maximale sont compatibles avec les masses à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de $\pm 1/1000$ de la valeur mesurée
- Un tamis à maille carrée de 2 mm d'ouverture.
- Des éprouvettes de volume 250 cm³ munis de bouchons

- Une source de chaleur permettant de porter à l'échantillon l'eau contenue dans le ballon du pycnomètre.



Figure 2.1 : Pycnomètre avec les équipements nécessaires

2.2.2.3. Préparation de l'échantillon et matériels

Tout d'abord, il faut s'assurer de la provenance et de la nature géologique du sol et procéder à une identification visuelle sommaire afin de savoir si les sols sont gypsifères, latéritique ou s'ils contiennent, de plus, des matières organiques. Les sols énumérés sont, en effet, sensibles à la chaleur. En cas de doute le sol est traité comme s'il était sensible à la chaleur.

Une prise d'essai d'environ 25g est prélevée sur le tamisat de l'échantillon du sol au tamis de 2 mm, puis est placée dans une coupelle de masse connue (m). L'ensemble est introduit dans une étuve dont la température est :

- 105°C si les sols sont insensibles à la chaleur.
- 50°C si les sols sont sensibles à la chaleur, La durée du séchage est alors variable entre 1 et 8 jours

Le séchage est terminé si la masse (m_s) de l'échantillon ne varie pas de plus de 2/1000 entre deux pesées effectuées, immédiatement après la sortie de l'étuve, à au moins 4h d'intervalle.

Les agglomérats de particules de la prise d'essai sont ensuite séparés au pilon dans le mortier.

Le pycnomètre et son bouchon sont pesés (m_1) après s'être assuré qu'ils étaient propres et secs.

2.2.2.4. Mode opératoire

1. Peser une petite quantité de sol sec (environ 25 g) qu'on veut déterminer sa masse volumique
2. Peser le pycnomètre et son bouchon qui doivent être propres et secs (m_1)
3. Introduire la prise d'essai dans le pycnomètre et puis le peser avec son bouchon (m_2)
4. Remplir le ballon du pycnomètre avec de l'eau distillée et puis éliminer les bulles d'air par dépression ou par ébullition.
5. Compléter le remplissage du pycnomètre avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge et puis peser le pycnomètre avec son bouchon (m_3)
6. Vider et nettoyer le pycnomètre
7. Remplir le pycnomètre avec l'eau distillée jusqu'au trait de jauge et puis le peser avec son bouchon (m_4)
8. Calculer la masse volumique des grains solides en utilisant la formule suivante :

$$\rho_s = \rho_w \cdot (m_2 - m_1) / (m_4 + m_2 - m_1 - m_3) \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

2.3. Mesure de la teneur en eau par la méthode de la poêle à frire

2.3.1. Définitions

Pour les besoins du présent TP, les définitions suivantes s'appliquent :

Teneur en eau pondérale d'un matériau (w) : rapport de la masse de l'eau évaporée lors de l'étuvage (mw) sur la masse des grains solides (md), exprimé en pourcentage :

$$W = mw / (md)$$

Teneur en eau naturelle (wnat) d'un matériau : Teneur en eau déterminée lorsque les conditions de prélèvement sur site, de transport et de conservation de l'échantillon n'ont entraîné aucune modification de celle-ci.

2.3.2. Principe de la détermination de la teneur en eau

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.

2.3.3. Équipements nécessaires

Le matériel suivant est nécessaire :

- une étuve de dessiccation à une température réglable à (100 – 105°c).
- balances de portées maximale et minimale compatible avec les masses à peser et telles que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la masse de matériau.
- Des coupelles, des boîtes de pétri, des vases à peser ou des bacs en matériau non altérable à l'humidité et à la chaleur.

2.3.3. Mode opératoire

Cette méthode de mesure de la teneur en eau se pratique sur le chantier. Elle fait l'objet d'une norme (NF P94-049-2). On procède comme suit :

- peser un récipient vide et sec : soit la tare T ;
- prélever un échantillon de sol à étudier ;
- peser le récipient rempli de sol à tester : soit la masse totale humide m_{th} ;
- chauffer le sol suffisamment pour le sécher complètement, mais sans le décomposer (pour l'argile). On utilisera un bec Bunsen, un camping gaz, de l'alcool à brûler, etc. ;
- peser le récipient avec le sol sec : soit la masse totale sèche m_{td} ;
- la teneur en eau du sol w est alors donnée par la relation :

$$w = (m_{th} - m_{td}) / (m_{td} - T)$$

2.4. Travail demandé

1. Déterminer la masse volumique des grains solides d'un sable dont le diamètre maximal des grains est inférieure à 2 mm.
2. Répéter l'essai trois fois puis calculer ρ_s moyenne.
3. Déterminer la teneur en eau d'un échantillon humide.
3. Commenter les résultats.

2.5. Feuille d'essai- Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau)

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

Date :

Nom & prenom:

Groupe :

➤ Pour la masse volumique des grains solides

Tableau 2.1 : Résultats de la masse volumique des grains solides

Essais	Essai 1	Essai 2	Essai 3
m_1 (gr)			
m_2 (gr)			
m_3 (gr)			
m_4 (gr)			
ρ_s (gr/cm ³)			
$\rho_{s \text{ Moy}}$ (gr/cm ³)			

➤ Pour la teneur en eau

Tableau 2.2 : Résultats de la teneur en eau

T (gr)	
m_{th} (gr)	
m_{td} (gr)	
w (%)	

2.6. Exemple d'essai- Mesure des caractéristiques pondérales (masse volumique – teneur en eau)

➤ Pour la masse volumique des grains solides

Les résultats obtenus à partir d'un essai de la masse volumique des grains solides ont été présentés dans le tableau 2.3.

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

Tableau 2.3 : Exemple de résultats de la masse volumique des grains solides

Essais	Essai 1	Essai 2	Essai 3
m_1 (gr)	295.5	295.5	295.5
m_2 (gr)	320.5	320.5	320.5
m_3 (gr)	671.2	671.1	671.05
m_4 (gr)	655.5	655.5	655.5
ρ_s (gr/cm ³)	2.688	2.659	2.646
$\rho_{s \text{ Moy}}$ (gr/cm ³)	2.664		

Alors la masse volumique des grains solides de ce sol est : $\rho_s = 2.664 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$

➤ **Pour la teneur en eau**

Les résultats obtenus à partir d'un essai de la teneur en eau ont été illustrés dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Exemple de résultats d'un essai de la teneur en eau

T (gr)	211
m_{th} (gr)	282
m_{td} (gr)	274
w (%)	12.69

Alors la teneur en eau de ce sol est : $w = 12.69\%$.

- **Commentaire de résultats :** on a trouvé que la teneur en eau, $w = 12.69\%$, donc cette teneur en eau obtenue confirme que notre sol utilisé est un sable ($w = 1$ à 15%).

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

3.1 Objectifs de TP

1. Apprendre les différentes étapes à suivre pour effectuer un essai de limites d'Atterberg,
2. Connaître les trois états physiques d'un sol,
3. Savoir calculer les différents paramètres liés à cet essai,
4. Tracer la courbe semi-logarithmique $\omega = f(\log N)$,
5. Définir les différents teneurs en eau ω_L , ω_p ainsi que les différents indices, tels que l'indice de liquidité I_L et l'indice de plasticité I_p ,
6. Apprendre à identifier le sol en utilisant l'abaque de Casagrande,
7. Interpréter les résultats.

3.2. Pre-requis

Pour identifier le sol étudié, l'étudiant a besoin d'avoir des notions et des connaissances de base sur la physique, tels que les notions sur la masse, le poids, la masse volumique, le poids volumique, la densité etc... et il doit avoir la motivation et l'envie de comprendre et d'apprendre de faire des essais en laboratoire pour l'identifier les sols

3.3. Définitions et principe de l'essai

Le comportement d'un sol fin (argile, limon, marne, etc) dépend essentiellement de son état physique, ce dernier étant défini en fonction de la teneur en eau. L'essai pour la détermination des limites d'Atterberg permet de délimiter les trois états physiques du sol fin : solide, liquide et plastique par des teneurs en eau limites :

- **Limite de liquidité** ω_L ,
- **Limite de plasticité** ω_p et
- **Limite de retrait** ω_R ,

Comme le schématise la figure 3.1.

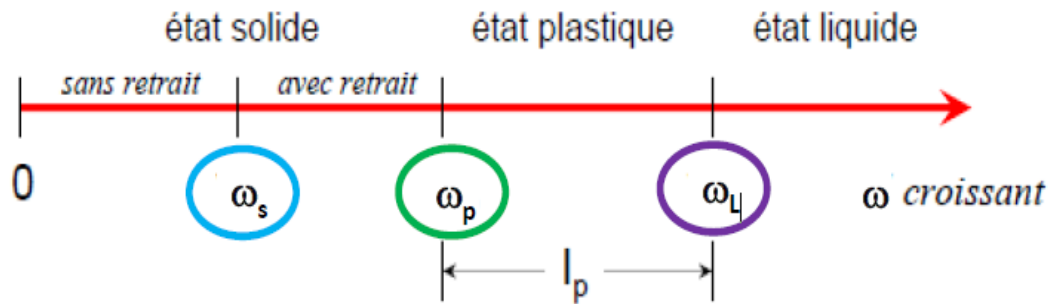


Figure 3.1. Limites d'état physique du sol fin en fonction de sa teneur en eau

3.3.1. Consistance des sols fins

La consistance est définie comme un état de fermeté, elle est liée aux forces de cohésion entre les particules de sols cohérents. Elle a une grande influence sur la résistance aux déformations. Les états de consistance

➤ L'état solide

Les particules sont en contact les unes avec les autres, l'assèchement du sol ne produit aucun retrait. Grande résistance au cisaillement. Faibles déformations avant rupture.

➤ L'état semi-solide

Faible teneur en eau. Liens de cohésion entre particules très forts. Assèchement de sol produit un retrait. Déformations sous charges accompagnées de fissures.

➤ L'état plastique

Teneur en eau plus grande. Particules éloignées les unes des autres. La cohésion est plus faible. Sous de petites charges, le sol se déforme sans fissures. Sol pouvant être façonné à la main.

➤ L'état liquide

Teneur en eau si élevée, que la cohésion entre particules est pratiquement nulle. Le sol peut se comporter comme un liquide.

3.3.2. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg ω_L et ω_p sont des teneurs en eau correspondant conventionnellement au passage du sol fin d'un état à un autre état. Ces limites diffèrent d'un sol à un autre en raison de leurs compositions chimiques et minéralogiques ainsi que de la forme et de la

dimension des particules. Les limites de plasticité et de liquidité servent surtout à identifier et à classer les sols fins :

- **Limite de retrait (ω_s)** : sépare l'état solide de l'état semi-solide. C'est la teneur en eau maximale que le sol peut avoir sans changer de volume. La limite de retrait ω_R est la teneur en eau pour laquelle une perte d'eau (par évaporation par exemple) n'entraîne pas une réduction de volume du sol. Elle trouve son application dans l'étude des sols fins gonflants.
- **Limite de plasticité (ω_p)** : sépare l'état plastique de l'état semi-solide. C'est la teneur en eau d'un sol qui a perdu sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à de faibles charges.
- **Limite de liquidité (ω_L)** : sépare l'état liquide de l'état plastique, c'est la teneur en eau correspondant au passage du sol fin d'un état plastique à l'état liquide. Ces limites s'expriment en pourcentage.

2.3.3. Indices de plasticité et de liquidité

2.3.3.1. Indice de plasticité (I_p en %)

Le sol fin est caractérisé par un **indice de plasticité**, noté par I_p , tel que :

$$I_p = \omega_L - \omega_p$$

Cet indice indique l'étendue de l'intervalle du domaine d'état plastique du sol. L'indice de plasticité est utilisé dans la classification des sols fins.

2.3.3.2. Indice de liquidité (I_L en %)

$$I_L = \frac{\omega_n - \omega_p}{\omega_L - \omega_p}$$

Si $I_L < 0$ rupture fragile

Si $0 < I_L < 1$ comportement plastique

Si $I_L > 1$ liquide visqueux, avec ω_n est la teneur naturelle en eau de l'échantillon.

2.3.3.3. Indice de consistance (I_c en %)

On définit l'indice de consistance I_c par :

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

Cet indice caractérise l'état de consistance d'un sol fin en fonction de sa teneur en eau. On peut ainsi apprécier l'état de compacité selon les valeurs de I_c comme le montre le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Marges de consistance des sols argileux

I_c	< 0	0-0,25	0,25-0,5	0,5-0,75	0,75-1	> 1
Consistance	Liquide	Très molle	Molle	Ferme	Très ferme	Dure

Le diagramme de la figure 3.2, proposé par Casagrande, permet de classer un sol fin en fonction de I_p et ω_L

3.4. Diagramme de plasticité – abaque de casagrande

Le diagramme de plasticité est divisé en deux zones par la ligne A. Selon la plasticité des sols, la majorité des argiles inorganiques sont représentées par des points situés dans la zone au-dessus de la ligne A (sans dépasser une limite supérieure identifiée par la ligne U).

Tous les silts (limons) inorganiques et les sols contenant de la matière organique sont associés à des points situés sous la ligne A.

La surface hachurée est une zone frontière qui contient des points correspondant soit à des argiles limoneuses, soit à des limons (silts) argileux.

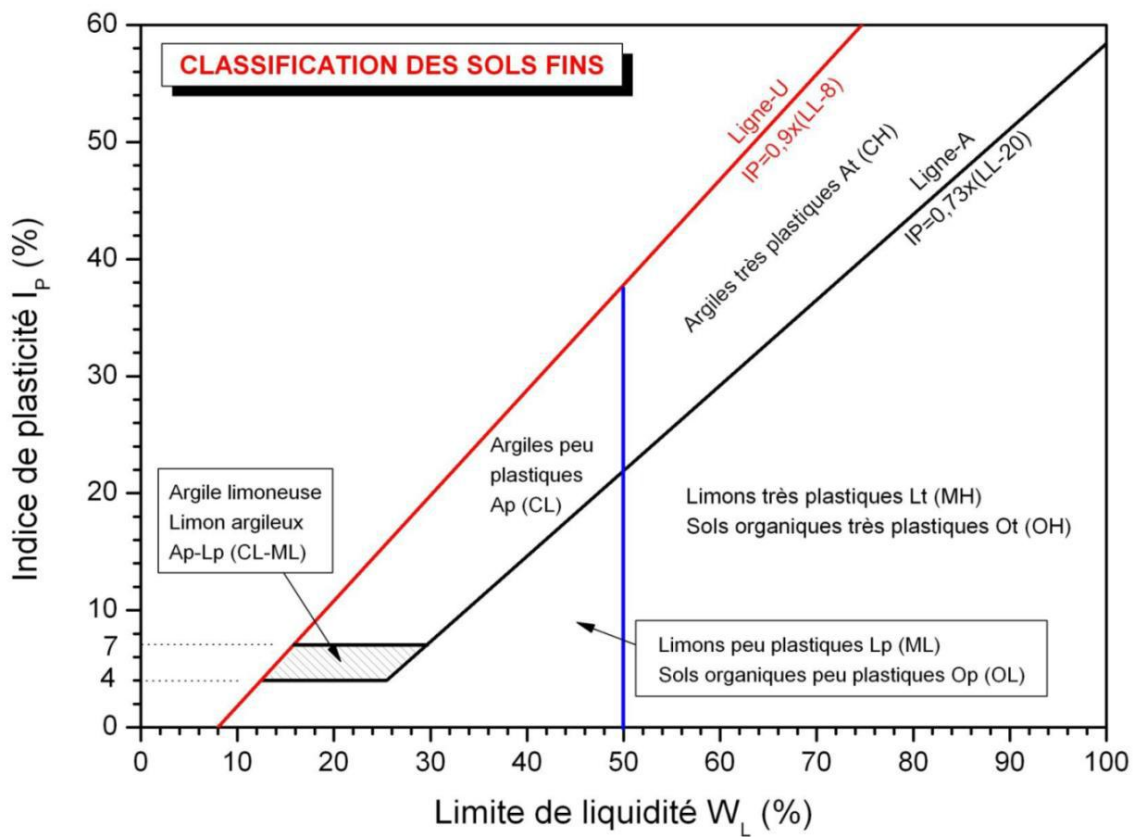


Figure 3.2. Diagramme de plasticité de Casagrande

3.5. Détermination de la limite de liquidité

3.5.1 Équipements nécessaires

3.5.1.1 Appareillage spécifique (pour la détermination de la limite de liquidité) (voir figure 3.3)

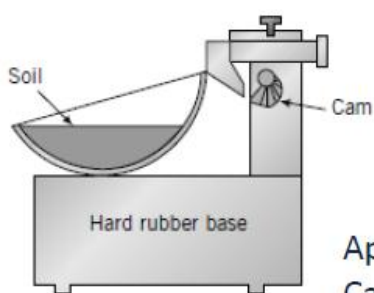
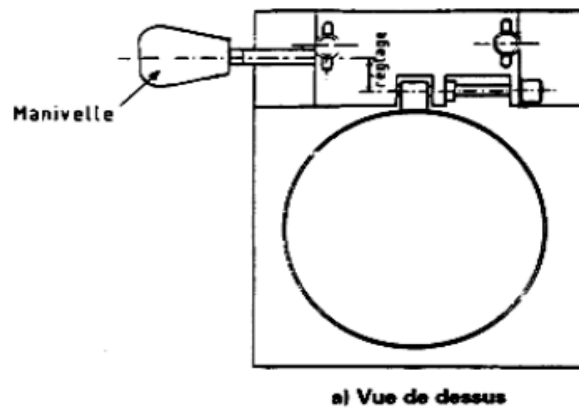
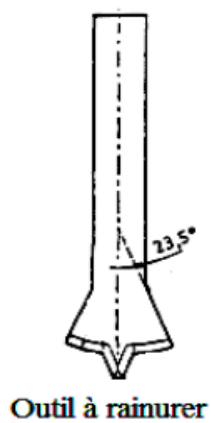
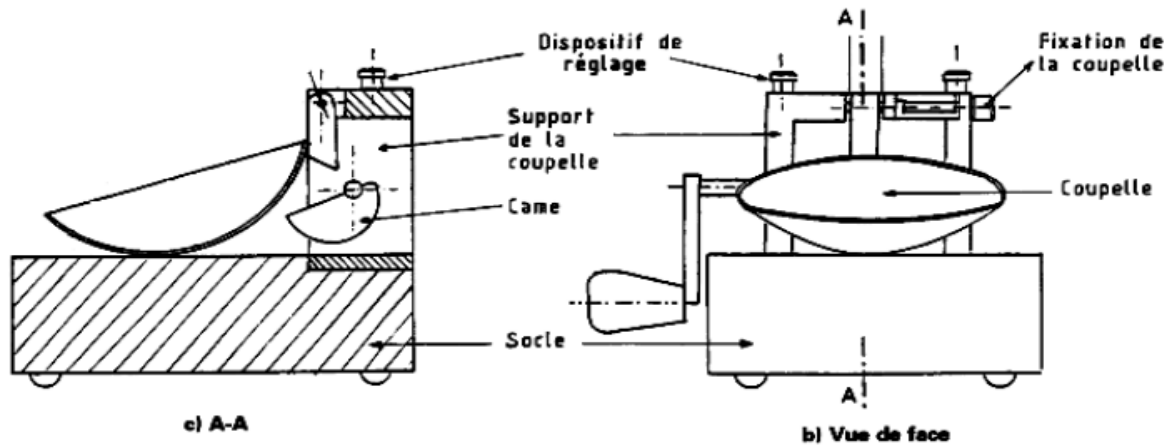
- 1- Appareil de Casagrande,
- 2- Outil à rainurer,
- 3- Accessoires :
- 4- une cale de 10 mm pour le réglage de la hauteur de chute de la coupelle,

3.5.1.2. Appareillage d'usage courant

- 1- marbre pour le malaxage du mortier,
- 2- truelle,
- 3- balance de précision,

4- étuve réglable à 105° C,

5- tamis de 0.4 mm d'ouverture.



Appareil de Casagrande

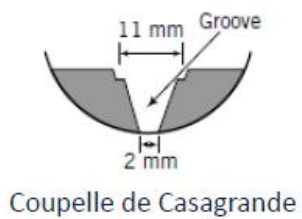


Figure 3.3. Photo et schémas de l'appareil de Casagrande pour déterminer ω_L

3.5.2. Préparation de l'échantillon

L'essai se fait sur une fraction du matériau qui passe au tamis de 0.4 mm. Une quantité suffisante du matériau doit être tamisée pour obtenir une quantité de 150 à 200 g de cette fraction.

- Prendre un échantillon représentatif du sol et le mettre à imbiber dans un récipient plein d'eau pendant 24 heures.
- Tamiser ce matériau imbibé par voie humide sur un tamis de 400 μ m, l'ensemble du tamisat et des eaux de lavage sont ensuite décanté pendant 12 heures.
- L'eau claire surnageant est siphonnée en prenant garde de ne pas entrainer les particules solides, l'eau excédentaire étant évaporée à l'étuve à 50°C jusqu'à obtenir un mortier mou.
- L'échantillon ainsi préparé doit contenir environ 200g de particules fines.

3.5.3. Mode opératoire

3.5.3.1. Réglage de la hauteur de chute

Ce réglage se fait à l'aide d'une cale en déplaçant la plaque coulissante de l'appareil de Casagrande de telle façon que la hauteur de chute de l'appareil soit exactement de 10 mm lorsque la came commandée par la manivelle est dans la position adéquate.

3.5.3.2. Exécution des essais

- L'échantillon est mis en place à la spatule de façon bien homogène (environ 70g). L'épaisseur au centre est de 15 à 20 mm, le pourtour étant sensiblement horizontal.
- A l'aide de l'outil à rainurer, on creuse ensuite une rainure dans le mortier.
- La coupelle fixée à l'appareil est ensuite soumise à l'aide de la manivelle à une série de chocs réguliers à raison de 2 coups par seconde.
- On compte le nombre de chocs nécessaire à la fermeture des lèvres de la rainure sur une longueur de 1 cm appréciée à l'œil (voir figure 5). Le nombre des coups de fermeture est compris en général entre 15 et 35.
- Il faut doubler l'essai pour vérifier le nombre de chocs nécessaire à la fermeture.

- On prélève deux échantillons de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit de fermeture afin de les peser et les passer à l'étuve pour déterminer la teneur en eau.
- L'opérateur se contrôlera lui-même en faisant l'essai suivant avec une teneur en eau plus faible. Le nombre de chocs devra augmenter approximativement de 5 unités par rapport à l'essai précédent.
- Ainsi, 3 essais correspondant à des coups entre 15 et 35 sont suffisants pour estimer correctement ω_l .
- Entre deux essais, nettoyer la coupelle à l'eau.

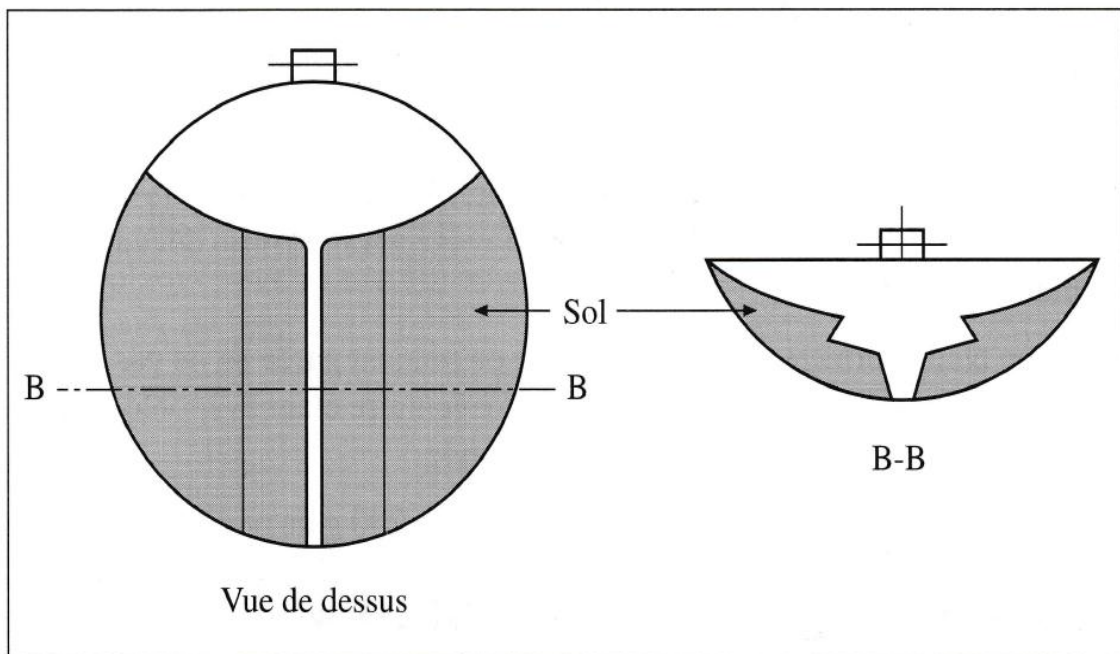


Figure 3.4 : schémas de l'échantillon préparé (AFNOR)

3.5.4. Expression des résultats

La limite de liquidité est, par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau (exprimée en %) qui correspond à une fermeture en 25 chocs. Elle est déterminée en reportant sur un graphique semi-logarithmique les teneurs en eau mesurées en fonction du logarithme du nombre de chocs. La relation $\omega = f(\text{Log } N)$ est sensiblement linéaire.

Note : effectuer l'opération 4 à 5 fois avec des teneurs en eau différentes tels que le nombre de chocs soit compris entre 15 et 35.

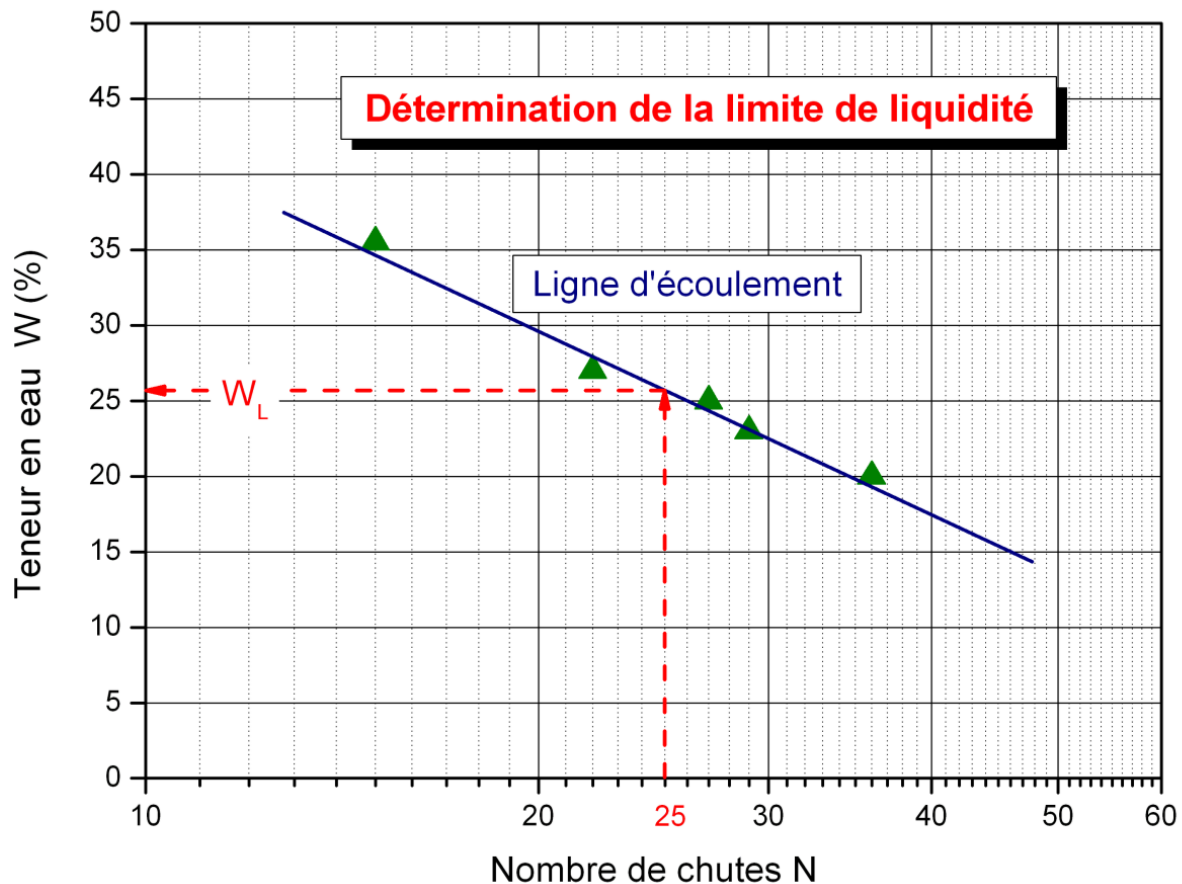


Figure 3.5 : détermination de la limite de liquidité ω_l

Remarque :

- Si le nombre de chocs est inférieur à 15, laissé sécher un peu.
- Si le nombre de chocs est supérieur à 35, humidifier légèrement et homogénéiser l'échantillon avant de reprendre l'essai.

On constate expérimentalement qu'on peut estimer approximativement ω_l à partir d'un seul essai à l'aide de l'équation proposée par Casagrande :

$$\omega_L = \omega N \times \left(\frac{N}{25}\right)^{tg \beta} \quad \text{avec } tg \beta = 0,121$$

ωN : teneur en eau du sol nécessitant N chutes pour que l'entaille se referme sur une longueur de 10 mm. Cette relation permet d'estimer la limite de liquidité avec un seul essai. Toutefois, elle n'est utilisée que si le nombre de chutes N est entre 15 et 35.

3.6. Limite de plasticité

3.6.1 Équipements nécessaires

1. une plaque en marbre pour le malaxage et la confection des rouleaux de sol.
2. des tares à masses connues.
3. une étuve et une balance définies déjà.
4. une plaque de verre de 5 cm de largeur et de 10,5 cm de longueur et une cale de 0,5cm, (voir figure 3.6).

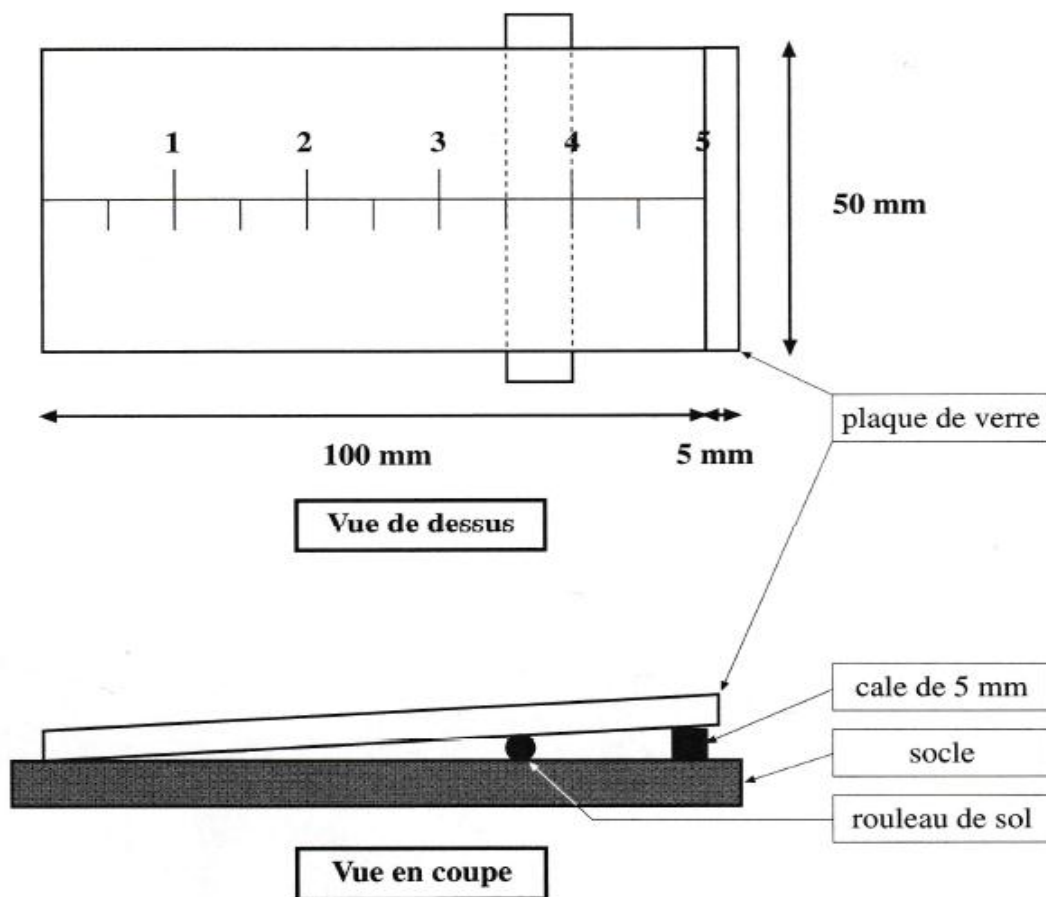


Figure 3.6 : Matériels nécessaires pour la détermination de ω_p

3.6.2. Mode opératoire

- On forme une boulette de l'échantillon, et à l'aide d'une plaque ou à la main on roule l'échantillon sur le marbre de façon à former un rouleau qu'on amincit progressivement jusqu'à ce qu'il se brise en des morceaux de 1 à 2 cm de longueur avec un diamètre de $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$.
- Récupérer l'échantillon et le placer dans une tare, le peser et le passer à l'étuve.

- Répéter l'essai sur un deuxième échantillon et le placer dans une autre tare puis le peser et le passer à l'étuve.

3.6.3. Expression des résultats

La limite de plasticité est, par définition, la teneur en eau correspondant à un rouleau du matériau qui se brise en tronçons de 1 à 2 cm lorsqu'on le fait amincir, en atteignant un diamètre de 3 mm.

Remarque :

Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau est réintégré à la boulette. La pâte est malaxée en étant séchée légèrement, éventuellement sous un flux d'air chaud à une température inférieure à 50°C.

Reformer un nouveau rouleau.

Prélever, une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau et la placer dans une boîte de masse connue, la peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau (norme NF P 94-050)

3.7. Travail demandé

Effectuer un essai de limites d'Atterberg sur le limon de Chlef pour l'objet de déterminer l'indice de plasticité I_p ;

Partie 1 : détermination de la limite de liquidité

1. Prélever un peu de mortier de part et d'autre de la rainure et placer l'ensemble du prélèvement sur une tare du poids T , et peser immédiatement, soit m_{th} ,
2. Mettre à l'étuve pendant 24 heures, jusqu'à dessiccation complète,
3. Déduire la teneur en eau de l'échantillon ω en utilisant la formule suivante.

$$w = ((m_{th} - m_{td}) / (m_{td} - T)) * 100$$

4. Répéter l'essai 4 à 5 fois.
5. Tracer la courbe $w = f(N)$.
6. Déduire la limite de liquidité de ce limon (w_L)

Ou :

w : la teneur en eau (exprimée en %),

T : poids de la tare,

m_{th} : poids de l'échantillon y compris la tare,

m_{td} : poids de l'échantillon sec y compris la tare.

Partie 2 : détermination de la limite de plasticité

1. Faire deux essais de la limite d'Atterberg pour le but de déterminer la limite de plasticité.
2. Calculer la teneur en eau de chaque essai. Il ne faut pas que la différence excède 2 %.
On prend alors la valeur moyenne qui correspond d'après la définition conventionnelle à ω_p .

Partie 3 : détermination de l'indice de plasticité et classification du matériau utilise selon de plasticité de Casagrande.

1. Dédurre l'indice de plasticité $I_p = \omega_l - \omega_p$
2. Classer le matériau à partir du diagramme de plasticité de Casagrande.

3.8. Feuille d'essai-Limites d'Atterberg

Date :

Nom & prenom:

Groupe :

➤ Limite de liquidité :

Tableau 3.2 : Résultats de la limite de liquidité

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
N °de la tare					
Poids total humide, m_{th} (gr)					
Poids total sec m_{td} (gr)					

Poids de la tare T (gr)					
Poids du sol sec m_d (gr)					
Poids de l'eau m_w (gr)					
Teneur en eau WL(%)					
Nombre de coup N (-)					

➤ **Limite de plasticité :**

Tableau 3.3: Résultats de la limite de plasticité

	Essai 1	Essai 2
N °de la tare		
Poids total humide, m_{th} (gr)		
Poids total sec m_{td} (gr)		
Poids de la tare T (gr)		
Poids du sol sec m_d (gr)		
Poids de l'eau m_w		
Teneur en eau W(%)		

3.9. Exemple d'essai- Limites d'Atterberg

Les résultats obtenus à partir d'un essai de limites d'Atterberg (limite de liquidité et de plasticité) ont été présentés dans les tableaux (3.4 et 3.5), respectivement.

Tableau 3.4 : Exemple de résultats de la limite de liquidité

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
N °de la tare	1	2	3	4
Poids total humide, m_{th} (gr)	29.5	29.1	29.15	29.3
Poids total sec m_{td} (gr)	27.4	26.8	26.8	26.7
Poids de la tare T (gr)	20.9	20.4	20.4	20.3
Poids du sol sec m_d (gr)	6.5	6.4	6.4	6.4
Poids de l'eau m_w (gr)	2.1	2.3	2.35	2.4
Teneur en eau WL(%)	32.3	35.94	36.71	37.5
Nombre de coup N (-)	29	24	17	11

Pour notre sol, d'après la figure 3.7, on constate que la limite de liquidité $w_l = 34,72\%$. Ce qui nous donne un indice de plasticité : $I_p = 34,72\% - 23,58\% = 10,79\%$.

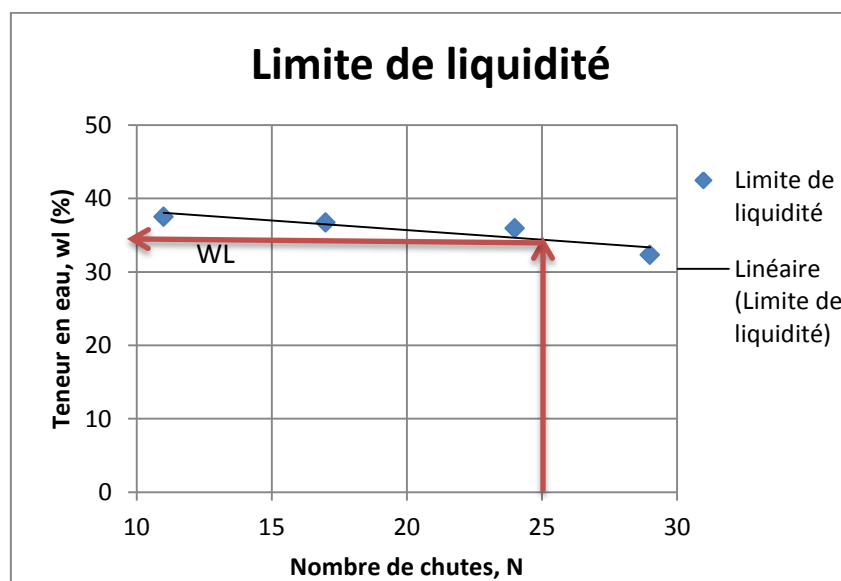


Figure 3.7 : Exemple de détermination de la limite de liquidité w_l

Tableau 3.5: Résultats de la limite de plasticité

	Essai 1	Essai 2
N °de la tare	1	2
Poids total humide, m_{th} (gr)	24.1	23.5
Poids total sec m_{td} (gr)	23.5	22.9
Poids de la tare T (gr)	20.9	20.4
Poids du sol sec m_d (gr)	2.6	2.5
Poids de l'eau m_w	0.6	0.6
Teneur en eau WL(%)	23.07	24
Teneur en eau Wmoy(%)	23.58	

Commentaire de résultats : D'après les résultats de limites d'Atterberg obtenus, on a trouvé que $IP=10.79\%$. Donc, selon l'indice de plasticité et la limite de liquidité (figure 3.2) on peut classier que le sol testé est une argile peu plastique.

4. TP 3 : Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)

4.1. Objectifs de TP

1. Différencier entre une analyse granulométrique par sédimentométrie et celle par tamisage ;
2. Apprendre les différentes étapes à suivre pour effectuer une analyse granulométrique d'un matériau ;
3. Tracer la courbe granulométrique du sable ;
4. Déterminer les caractéristiques granulométriques du sable.
5. Classifier le sol selon la norme française LCPC ;
6. Déterminer la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol passant à travers le tamis de 80 μm .
7. Interpréter et Expliquer.

4.2. Définitions

Les dépôts sont constitués de mélanges de types de sols et donc de particules de grosseurs différentes. Pour bien décrire un sol, il faut connaître sa **granulométrie**. C.à.d. la répartition de ses particules suivant leurs dimensions. La granulométrie est toujours effectuée sur une fraction 0/50 mm.

Deux essais de laboratoire permettent d'établir la granulométrie des sols :

- L'analyse granulométrique par tamisage :

Effectuée pour les graviers et les sables

- L'analyse granulométrique par sédimentométrie :

Destinée aux sols fins

Pour les sols pulvérulents contenant plus de 10 à 12% de particules fines (silt et argile) et pour les sols fins, l'analyse granulométriques doit se faire par tamisage et par sédimentométrie.

4.3. Analyse granulométrique par tamisage

4.3.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner un matériau en plusieurs classes granulaires au moyen d'une série des tamis emboîtables les uns dans les autres dont les ouvertures diminuent du haut vers le bas et à peser le refus cumulé sur chaque tamis.

4.3.2. Définitions

L'analyse granulométrique permet de définir la répartition en poids des grains constitutifs d'un sol selon leurs dimensions. On étudie la granulométrie d'un matériau en le tamisant sur une série normalisée de tamis ou passoires. Les grains sont ainsi séparés selon leurs tailles. On utilise en général une série normalisée de tamis dont les dimensions augmentent suivant une progression géométrique de raison égale à 1.259 et de valeur initiale de 80 μm (0,08mm).

La relation de Férét permet de faire la correspondance entre un tamis ayant une ouverture ou coté de carré a et sa passoire équivalente de diamètre ϕ , c'est à dire ayant le même pouvoir de tamisage, est : $\phi/a = 1,259$.

A partir de la courbe granulométrique, on définit deux coefficients de forme, caractérisant la distribution granulométrique comme suit :

- Coefficient d'uniformité ou de Hazen : $C_u = D_{60} / D_{10}$
- Coefficient de courbure : $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} * D_{10})$

Le coefficient d'uniformité permet d'exprimer l'étalement de la courbe granulométrique.

- $C_u \leq 2$ granulométrie très serrée
- $2 < C_u \leq 5$ granulométrie serrée (uniforme)
- $5 < C_u \leq 20$ granulométrie semi-étalée
- $20 < C_u \leq 200$ granulométrie étalée
- $200 < C_u$ granulométrie très étalée

Les grains se répartissent en fonction de leurs dimensions sur les tamis ou passoires. Dans chaque tamis, les matériaux retenus et passant sont respectivement appelés refus et tamisât. L'analyse granulométrique se fait par tamisage pour des particules ayant des dimensions égales au moins à 80 μm , et par sédimentométrie dans le cas contraire.

- **Termes granulométriques**

- a. **Granularité** : distribution dimensionnelle des grains.
- b. **Classe granulaire** : Les granulats sont désignés selon leur classe granulaire d/D (avec d : dimension inférieure et D : dimension supérieure). L'intervalle d/D est appelé classe

granulaire. Correspondant à l'ensemble des particules solides dont la dimension est comprise entre deux valeurs extrêmes.

c. **Refus sur un tamis** : quantité du matériau retenue sur un tamis.

d. **Tamisât ou passant** : quantité du matériau passant à travers les mailles d'un tamis.

Remarque

D_y : dimension du tamis correspondant à y % de tamisat. Par exemple D₆₀ : dimension du tamis correspondant à 60% de tamisat.

4.3.3. Équipements nécessaires

1- Une série de tamis métalliques emboîtables : chaque tamis est composé d'une toile métallique de mailles carrées dont l'ouverture est déterminée. La série de tamis utilisés pour l'analyse granulométrique du sable (0,08 - 0,10 - 0,125 - 0,16 - 0,2 - 0,25 - 0,315 - 0,4 - 0,5 - 0,63 - 0,8 - 1 - 1,25 - 1,6 - 2 - 2,5 - 3,15 - 4 - 5 mm). Les tamis doivent avoir le même diamètre.

2- Fond et couvercle : Ils ont le même diamètre que les tamis.

3- Tamiseuse : c'est un appareil électrique qui sert à agiter et vibrer la série de tamis empilés (figure 1.1).

4- Balance

5- Étuve : sert à sécher les matériaux.



Figure 4.1 : Tamiseuse et les tamis utilisés pour l'analyse granulométrique

4.3.4. Mode opératoire

- Laver puis sécher le matériau qu'on veut l'analyser (sable) ;
- Prendre une quantité de matériau sec (M_t). La masse M_t de l'échantillon à analyser doit être supérieure à 0,2 D et inférieure à 0,4 D, avec M_t est en kg, D est la plus grande dimension spécifiée en mm ;
- Placer la série des tamis convenable dans la machine à tamiser d'une manière ordonnée de sorte que l'ouverture des tamis diminue du haut vers le bas. Le fond doit être placé à la base de la série ;
- Verser le matériau lavé et séché dans la colonne de tamis ;
- Faire marcher l'appareil à vibrer pendant 7 à 15 min (généralement, on peut considérer qu'un tamisage est terminé lorsque le refus sur un tamis ne se modifie pas de plus de 1 % en une minute de tamisage) ;
- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille. Soit R_1 la masse de ce refus ;
- Peser le refus cumulé pour les autres tamis, un par un de haut vers le bas ($R_2, R_3, \dots R_n$) ;
- Peser le tamisat au dernier tamis, Soit T_n sa masse.

4.3.5. Expression des résultats

- Calculer le pourcentage de refus cumulé dans chaque tamis, où les masses des différents refus cumulés R_i sont rapportées à la masse totale de l'échantillon sec (M_t).

$$R_i (\%) = \left(\frac{R_i}{M_t} \right) * 100$$

- Calculer les pourcentages de tamisats cumulés correspondants comme suit :

$$T_i (\%) = 100 - R_i (\%)$$

- Tracer la courbe granulométrique :

En abscisse : les dimensions des mailles ou les ouvertures des tamis, sur une échelle logarithmique.

En ordonnée : les pourcentages de tamisats cumulés sur une échelle arithmétique.

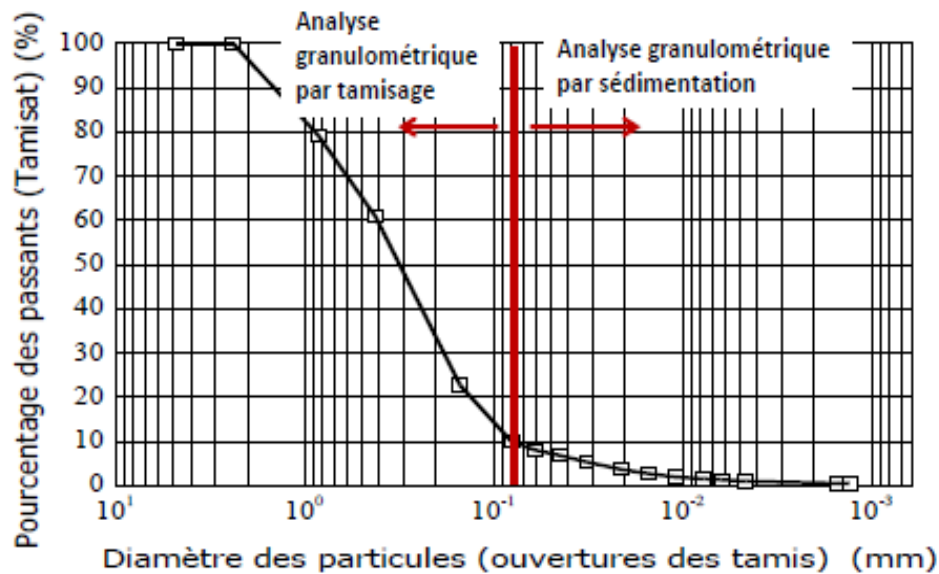


Figure 4.2 : Courbe granulométrique

4.3.6. Travail demandé

- Effectuer une analyse granulométrique par tamisage sur un sable ;
- Présenter les résultats obtenus de tamisats cumulés sur un tableau (en gramme et en pourcentage) ;
- Tracer les courbes granulométriques du sable ;
- Déduire les caractéristiques granulométriques du sable : D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{60} , C_c et C_u ;
- Commenter les résultats.

4.4. Analyse granulométrique par sédimentométrie

4.4.1. Principe de l'essai

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 sédimentation des grains est directement liée à leur diamètre D (loi de Stokes). Par convention, la loi de Stokes est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules.

4.4.2. Définition

L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai géotechnique qui complète l'analyse granulométrique par tamisage. Elle est utilisée pour les sols fins passant au tamis à

maille de 80 μm d'ouverture. Les particules fines sont placées en suspension dans de l'eau après un traitement chimique au dispersant pour inhiber les forces d'attraction entre particules.

L'évolution de la densité de la suspension au cours du temps est mesurée à l'aide d'un densimètre, et permet de déterminer la quantité de particules présente dans la suspension à chaque instant.

Le diamètre équivalent des particules en suspension est obtenu en utilisant la loi de Stokes qui évalue la vitesse de décantation des particules sphériques en suspension dans un liquide au repos.

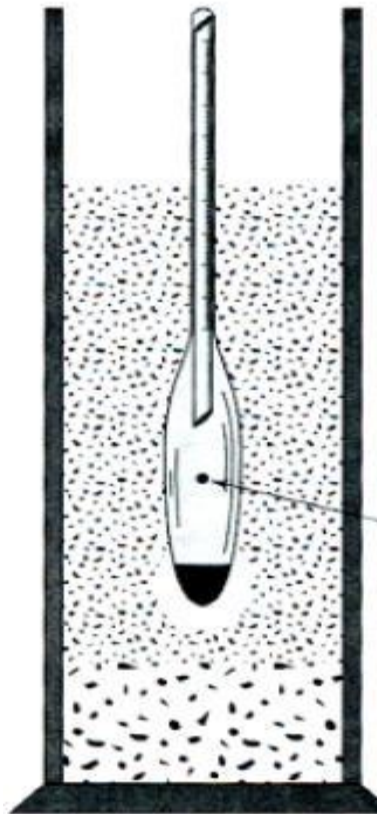


Figure 4.3 : Densimètre pour la réalisation d'une analyse granulométrique par sédimentation

L'analyse granulométrique sur des particules dont le diamètre équivalent $< 0,08\text{mm}$ est basée sur la relation de Stokes (1850) entre la vitesse de chute d'une sphère dans un liquide, le diamètre de la sphère, la densité relative de la sphère et du liquide et la densité du liquide

Les particules inférieures à 80 μm séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec

leur taille. Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et la profondeur d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données.

4.4.3. Équipement nécessaire

- Une balance, un tamis à maille carrée de 80 μm d'ouverture, un bac, une étuve,
- Un mortier avec pilon muni d'une extrémité en caoutchouc,
- Un agitateur mécanique avec son récipient (sa vitesse peut atteindre 10000 tr/min),
- Un défloculant (une solution à 5 % d'hexamétaphosphate de sodium préparée et conservée à l'abri de la lumière depuis moins d'un mois),
- Deux éprouvettes cylindriques en verre transparent, graduées, d'une contenance minimale de 2500 cm^3 et de diamètre intérieur de 85 mm $\pm$ 5mm,
- Eau distillée ou déminéralisée,
- Un agitateur manuel,
- Un densimètre, il doit être de forme torpille (voir fig. 3.4),
- Deux thermomètres,
- Un chronomètre.

4.4.5. Mode opératoire

Les opérations décrites ci-dessous sont successivement à réaliser dans une salle d'essai dont la température doit être contrôlée :

4.4.5.1 Préparation de la prise d'essai

- Le tamisat, au tamis de 80 μm , de l'échantillon de sol, est recueilli avec son eau de lavage dans un bac. Le tout est mis à décanter. Une fois redevenue claire, l'eau du bac est siphonnée avec précaution sans entraîner d'éléments fins.
- Le bac et son contenu sont ensuite placés dans une étuve jusqu'à séchage à poids constant. Après le séchage, désagréger le tamisat avec le pilon dans le mortier, puis l'homogénéiser. Ensuite, prélever une prise d'essai de 80 g $\pm$ 10 g.

- Introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique, puis ajouter 500 cm^3 d'un mélange constitué de 440 cm^3 d'eau distillée ou déminéralisée et 60 cm^3 d'une solution à 5 % d'hexamétaphosphate de sodium. Laisser imbiber pendant au moins 15 h à la température ambiante.
- La prise d'essai est dispersée dans la solution d'eau et de défloculant au moyen de l'agitateur mécanique qui doit fonctionner pendant au moins 3 min à 10000 tr/min.

4.4.5.2. Exécution de l'essai

A. Démarrage de l'essai

- Verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après la fin de l'agitation mécanique.
- Rincer le récipient ainsi que l'arbre et les palettes de l'agitateur avec de l'eau distillée ou déminéralisée. Le liquide de rinçage est recueilli dans l'éprouvette afin d'éviter de perdre une partie de l'échantillon de sol lors du transfert.
- Compléter par de l'eau distillée ou déminéralisée à la température ambiante jusqu'à 2000 cm^3 .
- Verser 2000 cm^3 de la même eau distillée ou déminéralisée dans une seconde éprouvette témoin et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propres.
- Agiter vigoureusement verticalement la suspension au moyen de l'agitateur manuel pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette.
- Retirer l'agitateur manuel et déclencher au même moment le chronomètre : par convention il s'agit du début de l'essai.
- Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre.

B. Exécution des mesures :

- Effectuer les lectures depuis le début de l'essai aussi longtemps que nécessaire, aux temps suivants : 30 s, 1, 2, 5, 10, 20, 40, 80, 240, 1440 min. A chaque lecture, noter la densité de la solution à 0,0001 près et la température de l'eau se trouvant dans l'éprouvette témoin à 0,1 °C près.

- Toutes les lectures du densimètre doivent être faites au sommet du ménisque (voir fig. 3.5).
- Exécuter les trois premières lectures (0,5, 1 et 2 min) sans retirer le densimètre de la solution.
- À partir de la troisième lecture ($t = 2$ min), retirer le densimètre de la solution après chaque mesure, le nettoyer puis le plonger dans l'éprouvette d'eau distillée ou déminéralisée.
- À partir de la quatrième lecture ($t = 5$ min), plonger le densimètre avec précaution dans la solution au minimum 30 s avant la mesure.

4.4.6. Expression des résultats

Pour chaque mesure, le pourcentage pondéral d'éléments inférieurs ou égaux à D contenus dans la suspension et le diamètre équivalent D des plus grosses particules non sédimentées sont déterminés comme suit :

4.4.6.1 Calcul du pourcentage d'éléments inférieurs ou égaux à D

A l'instant t , le pourcentage d'éléments inférieurs ou égaux à D contenus dans la suspension, par rapport à la masse de la prise d'essai à l'état sec, est calculé selon la formule suivante :

$$p = \frac{V_s}{m} \times \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \times \rho_w \times \left[\frac{\rho_t}{\rho_w} - 1 \right]$$

où : p est le pourcentage des particules de diamètre inférieur ou égal à D ; V_s est le volume de la suspension ; m est la masse de sol sec prélevée sur le tamisat à $80 \mu\text{m}$; ρ_s est la masse volumique des grains solides ; ρ_w est la masse volumique de l'eau distillée ou déminéralisée à la température d'essai ;

- ρ_t est la masse volumique de la suspension à l'instant t :

$$\rho_t = R_c \times \rho_w = (R + C_t + C_m + C_d) \rho_w$$

où : R_c est la lecture corrigée du densimètre à l'instant t ; R est la lecture du densimètre, au sommet du ménisque, à l'instant t ; C_t est la correction due aux variations de température en cours d'essai ; C_m est la correction due au ménisque ; C_d est la correction due au défloculant ;

4.4.6.2 Calcul du diamètre équivalent D

Le diamètre équivalent D des plus grosses particules non sédimentées à l'instant t est calculé comme suit :

$$D = \left[\frac{1}{g} \times \frac{18 \eta}{\rho_s - \rho_w} \times \frac{H_t}{t} \right]^{0,5}$$

où : D est le diamètre équivalent des particules ; g est l'accélération de la pesanteur ; t est le temps écoulé depuis le début de l'essai.

- ρ_w est la masse volumique de l'eau distillée à la température d'essai θ .
Conventionnellement :

$$\rho_w = 999 \text{ kg/m}^3 \text{ lorsque : } 12^\circ\text{C} \leq \theta \leq 18^\circ\text{C} ;$$

$$\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3 \text{ lorsque : } 18^\circ\text{C} < \theta < 24^\circ\text{C} ;$$

$$\rho_w = 997 \text{ kg/m}^3 \text{ lorsque : } 24^\circ\text{C} \leq \theta < 30^\circ\text{C}.$$

- η est la viscosité dynamique de la solution à l'instant t :

$$\eta = \frac{0,00179}{1 + \alpha \theta + \beta \theta^2}$$

où : θ est la température (en $^\circ\text{C}$) de l'éprouvette témoin à l'instant t ; $\alpha = 0,03368$; $\beta = 0,00022$.

- H_t est la profondeur effective du centre de poussée du densimètre à l'instant t :

$$H_t = H - 100 \times H_1 \times (R + C_m - 1) - H_c$$

où : R est la lecture du densimètre (sommet du ménisque) à l'instant t ; H_1 est la distance séparant la graduation 1,0000 de la graduation 1,0100 ;

- H est la distance séparant le milieu du bulbe du densimètre de la graduation 1,0000 :

$$H = H_0 + 0,5 \times h_1$$

☞ **Remarque :** H_0 , H_1 et h_1 étant des caractéristiques géométriques du densimètre obtenues lors d'étalonnage de l'appareillage (voir fig. 3.6).

- H_c est le déplacement du niveau de la solution lié à l'introduction du densimètre dans l'éprouvette d'essai :

- Pour les trois premières lectures : $H_c = 0$,
- A partir de la quatrième lecture : $H_c = 0,5 (V_d / A)$.

où : A est l'aire de la section droite de l'éprouvette d'essai ; V_d est le volume du bulbe du densimètre.

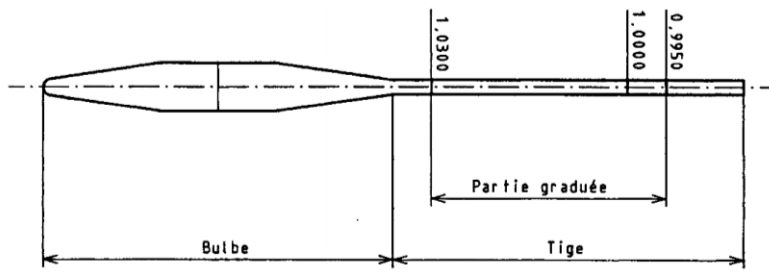


Figure 4.4 : Densimètre torpille.

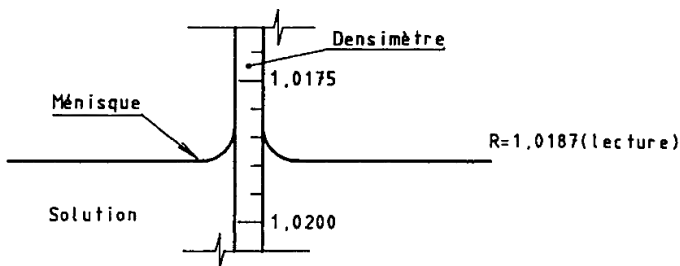


Figure 4.5 : Lecture du densimètre.

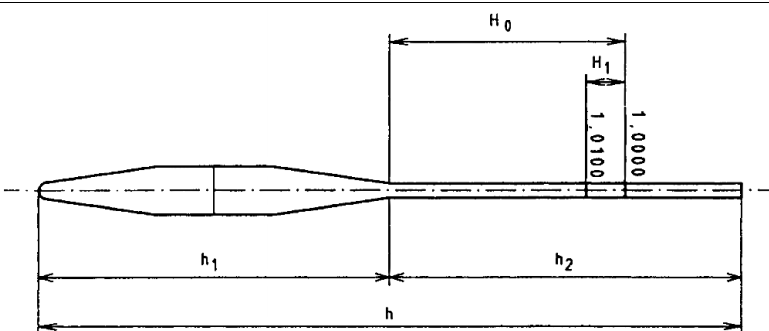


Figure 4.6 : Caractéristiques géométriques du densimètre.

4.4.7. Travail demandé

- Effectuer une analyse granulométrique par sédimentation pour un sol fin passant à travers le tamis à mailles carrées de $80\ \mu\text{m}$ d'ouverture.
- Présenter les résultats obtenus sur un tableau (en pourcentage) ;
- Calculer le diamètre équivalent D et le pourcentage d'éléments inférieurs ou égaux à D pour chaque mesure, puis tracer la courbe granulométrique.
- Commenter les résultats.

4.5. Feuille d'essai-Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)

- Pour l'essai de l'analyse granulométrique par tamisage

Date :

Nom & prenom:

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

Groupe :

Tableau 4.1: Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage

Diamètre de tamis (mm)	Refus (gr)	Refus cumulés (gr)	Tamisat cumulés (gr)	Refus cumulés (%)	Tamisat cumulés (%)
2					
1					
0,63					
0,25					
0,125					
0,08					
Fond					

➤ **Pour l'essai de l'analyse granulométrique par sédimentométrie**

Tableau 4.2: Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie

Temps			(R)	T (°C)	Ct	P _w	Pt	P (%)	Ht (m)	η	D (um)
H	Min	s									
		30									
	1	60									
	2	120									
	5	300									
	10	600									
	20	1200									
	40	2400									
	80	4800									
4		14400									

24		86400									
----	--	-------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

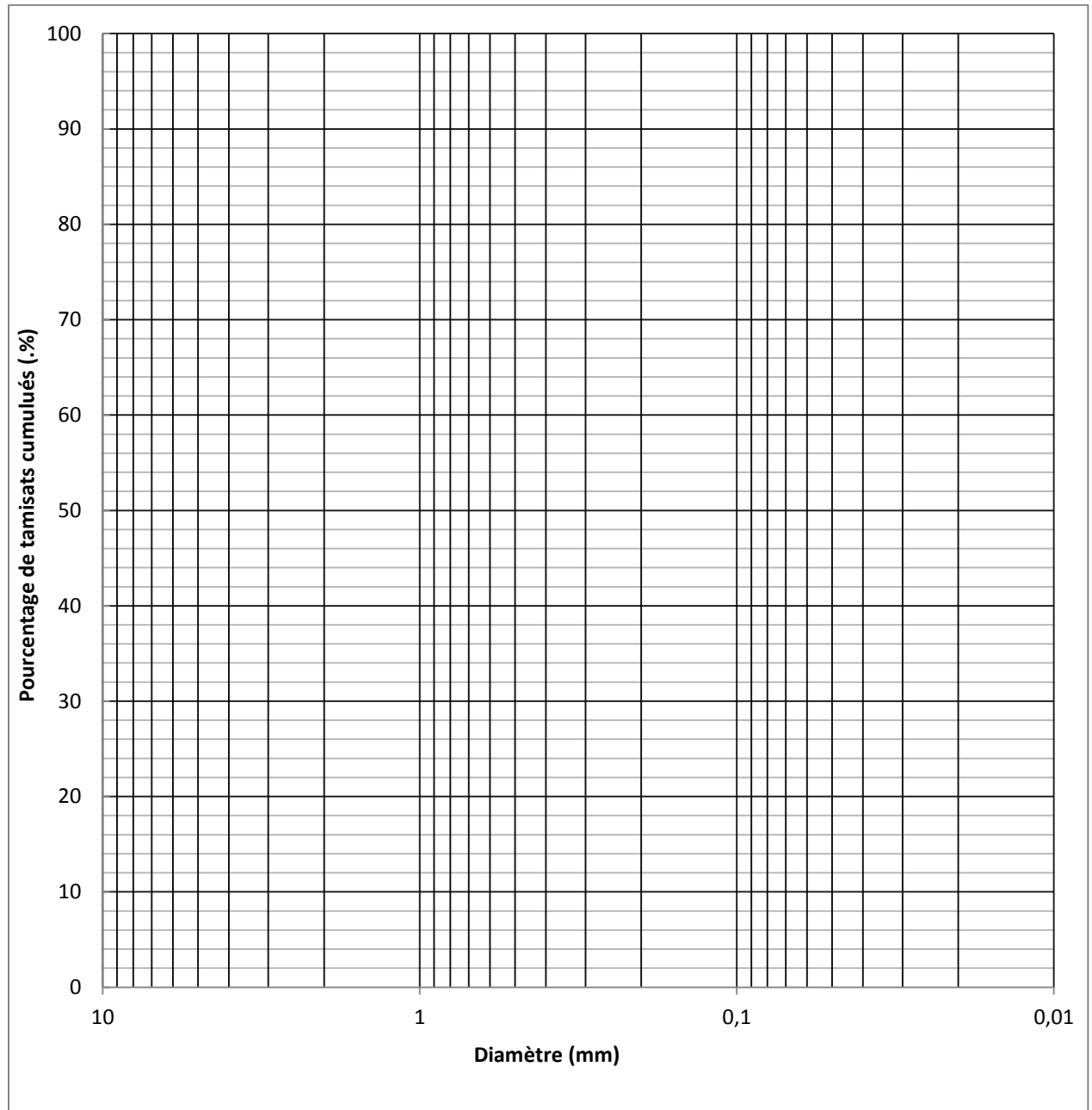


Figure 4.7 : Courbe granulométrique

4.6. Exemple d'essai- Analyse granulométrique (par tamisage et sédimentométrie)

- Pour l'essai de l'analyse granulométrique par tamisage

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

Données de l'essai :

Sable propre ($D_{\max} = 2 \text{ mm}$ et $D_{\min} = 0.08 \text{ mm}$), $m = 500 \text{ gr}$

Les résultats obtenus de l'analyse granulométrique (par tamisage) ont été présentés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3: Exemple de résultats de l'analyse granulométrique par tamisage

Diamètre de tamis (mm)	Refus (gr)	Refus cumulés (gr)	Tamisat cumulés (gr)	Tamisat cumulés (%)
2	0	0	500	100
1	72.8	72.8	427.2	85.44
0,63	156.93	229.73	270.27	54.054
0,25	229.79	459.52	40.48	8.096
0,125	30.28	489.8	10.2	2.04
0,08	7.65	497.45	2.55	0.51
Fond	1.85	499.3	-	-

➤ Pour l'essai de l'analyse granulométrique par sédimentométrie

Données de l'essai :

$V_s = 0.001 \text{ m}^3$, $m = 40 \text{ gr}$, $\rho_s = 26.67 \text{ gr/cm}^3$, $C_m = 0.0004$, $C_d = -0.0011$, $A = 0.002826 \text{ m}^2$, $H = 0.1802 \text{ m}$, $H_1 = 0.0278 \text{ m}$, $H_c = 0.00884 \text{ m}$, $\alpha = 0,03368$; $\beta = 0,00022$.

Les résultats obtenus de l'analyse granulométrique (par sédimentométrie) ont été montrés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4: Exemple de résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie

Temps			(R)	T (°C)	Ct	P _w	Pt	P (%)	Ht (m)	$\eta \cdot 10^{-4}$	D (um)
H	Min	S									
		30	1.017	25	0.0015	997	1015.04	72.04	0.1221	9.0427	63.60
	1	60	1.016	25	0.0015	997	1013.85	67.27	0.1255	9.0427	45.58

	2	120	1.014	25	0.0015	997	1011.95	59.71	0.1308	9.0427	32.90
	5	300	1.012	24.6	0.0012	997	1009.16	48.56	0.1377	9.1249	21.45
	10	600	1.010	24.3	0.0011	997	1007.47	41.79	0.1422	9.187	15.46
	20	1200	1.008	24.2	0.0011	997	1005.94	35.69	0.1463	9.208	11.1
	40	2400	1.0074	23.7	0.0009	998	1005.58	30.3	0.1497	9.3142	7.99
	80	4800	1.0071	23.6	0.0008	998	1005.23	28.9	0.1505	9.3357	5.67
4		14400	1.007	23.6	0.0008	998	1005.13	28.5	0.1508	9.3357	3.28
24		86400	1.0058	23.6	0.0008	998	1003.94	23.72	0.1541	9.3357	1.3531

Les données de la présente étude (Tableaux 4.3 et 4.4) sont reproduites dans la Figure 4.8 en vue de déterminer les caractéristiques granulométriques considérant les deux Analyses granulométriques (par tamisage et sédimentométrie).

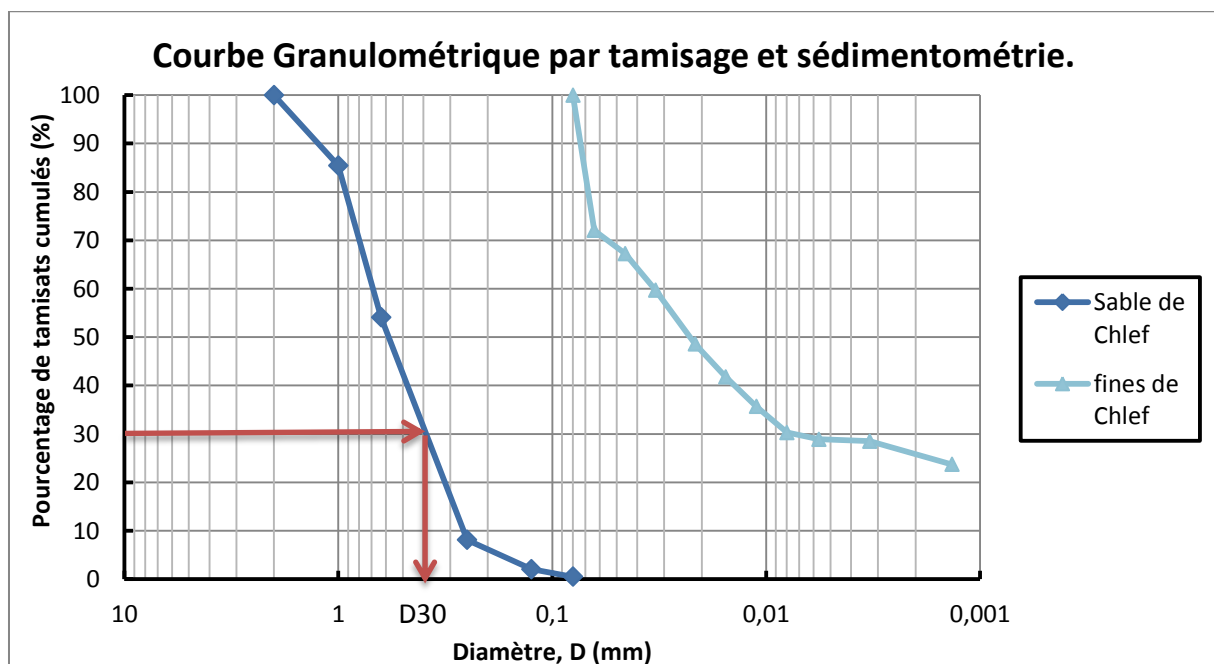


Figure 4.8 : Courbes granulométriques des matériaux utilisés.

➤ Détermination des caractéristiques granulométriques

Le tableau 4.5 illustre les caractéristiques granulométriques des matériaux utilisés (sable de Chlef et limon de Chlef).

Tableau 4.5: Caractéristiques granulométrique des matériaux utilisés.

Matériaux	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Cu (-)	Cc (-)
Sable	0,266	0,431	0,596	0,70	2,63	1
Limon	-	0,007	0,023	0,03	-	-

Commentaire de résultats : D'après les résultats de l'analyse granulométrique obtenus, on a remarqué que :

- 1- Le coefficient d'uniformité $Cu=2.63$, donc notre sable donne une granulométrie serrée (uniforme), ($2 < Cu \leq 5$).
- 2- Le coefficient de courbure $Cc=99$, donc le sable est mal gradué ($Cc \leq 1$).

5. TP 4 : Mesure des caractéristiques de compactage et de portance (essais Proctor et CBR)

5.1. Objectifs de TP

1. Apprendre les différentes étapes à suivre pour effectuer des essais de compactage et de portance (essais Proctor et de CBR),
2. Déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau (la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale) qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale,
3. Connaître la différence entre un essai Proctor normal et modifié,
4. Apprendre les caractéristiques d'un moule Proctor et un moule CBR,
5. Tracer la courbe de compactage pour une énergie de compactage donnée, $\gamma_d = f(w)$,
6. Déterminer l'indice CBR après immersion,
7. Déterminer l'indice CBR immédiat,
8. Déterminer l'indice portant immédiat (IPI).

5.2. Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié

5.2.1. Définitions et principe de l'essai

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage. 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 conventionnels. 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 (figure 5.1).

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.

* En construction de remblai en grande masse (barrages, remblais routiers...) on se réfère presque exclusivement à l'essai Proctor Normal ;

* En couches de chaussée on se réfère presque exclusivement à l'essai Proctor Modifié, réalisé avec une énergie supérieure. Cet essai permet de déterminer deux grandeurs fondamentales, en particulier pour le déroulement et le contrôle des chantiers de terrassement :

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

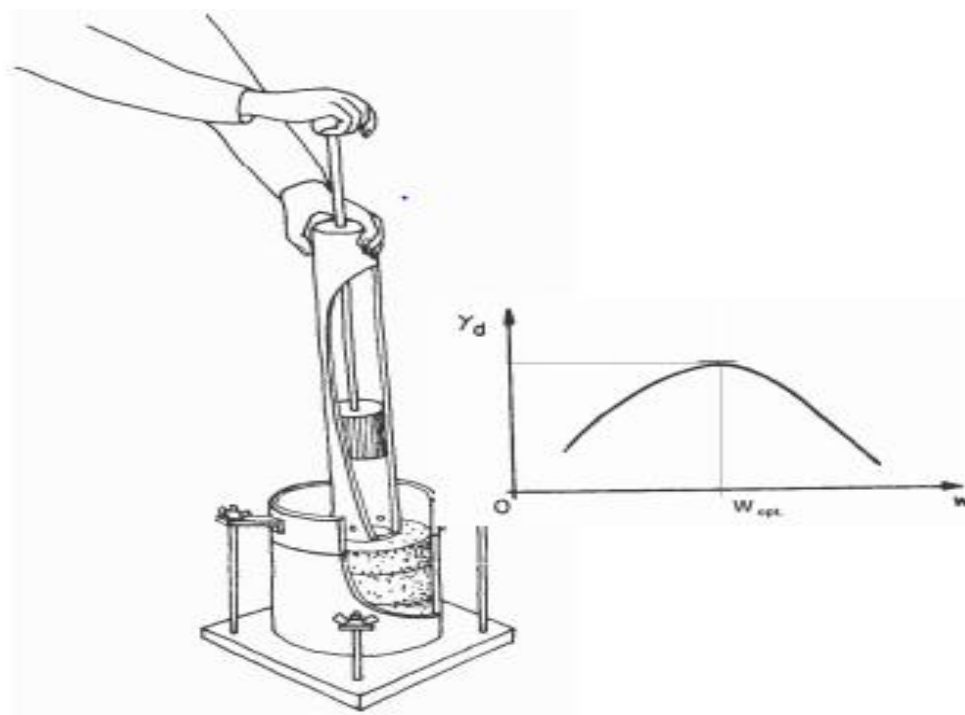


Figure 5.1: Essai Proctor

5.2.3. Équipements nécessaires

5.2.3.1. Appareillage spécifiques

- 1- Un socle de compactage constitué d'un bloc de béton présentant une surface plane horizontale d'au moins $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ et une épaisseur d'au moins 30 cm ;
- 2- 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.

3- Deux modèles de dames de compactage manuelles :

- la dame dite «dame Proctor normal» est constituée d'un mouton cylindrique de $51 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre. Ce mouton coulisse dans un fourreau qui lui autorise une hauteur de chute de $305 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. La masse de l'équipage mobile est de $2\,490 \text{ g} \pm 2,5 \text{ g}$. 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 $457 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ et la masse de l'équipage mobile de $4535 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$. Les formes et autres dimensions fonctionnelles de cette dame doivent être conformes aux indications portées sur la figure 1 ;

4- 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 ;

5- Les machines à compacter mécanisées peuvent avantageusement être utilisées si elles répondent aux conditions suivantes :

- la masse, diamètre, hauteur de chute du mouton, épaisseur du fourreau lorsque la machine en comporte un, sont tels que définis sur la figure 2 ;
- le mode de répartition des coups, précisé au paragraphe 7.2, est respecté ;
- 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% ;
- la machine est rendue solidaire d'un socle en béton dont l'épaisseur minimale est de 30 cm.

5.2.3.2 Appareillage d'usage courant

1- Tamis d'ouvertures de mailles carrées de dimensions nominales 5 mm et 20 mm ;

- 2- balances dont les portées maximale et minimale sont compatibles avec les masses à peser et telles que les pesées soient effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée ;
- 3- une enceinte thermique ou un appareil de séchage (étuve) pour déterminer la teneur en eau des matériaux selon une méthode normalisée (NF P 94-049-1, NF P 94-049-2, NF P 94-050) ;
- 4- des récipients (ou des sacs) hermétiques permettant de conserver la teneur en eau des échantillons ;
- 5- un pulvérisateur à eau ;
- 6- éventuellement un malaxeur-désagréateur mécanique dont le volume de la cuve est d'au moins 10 dm³ (voir exemple annexe B) ;
- 7- un dispositif permettant d'extraire l'éprouvette hors du corps du moule (dans le cas d'un corps de moule monobloc) ;

Dimensions en millimètres

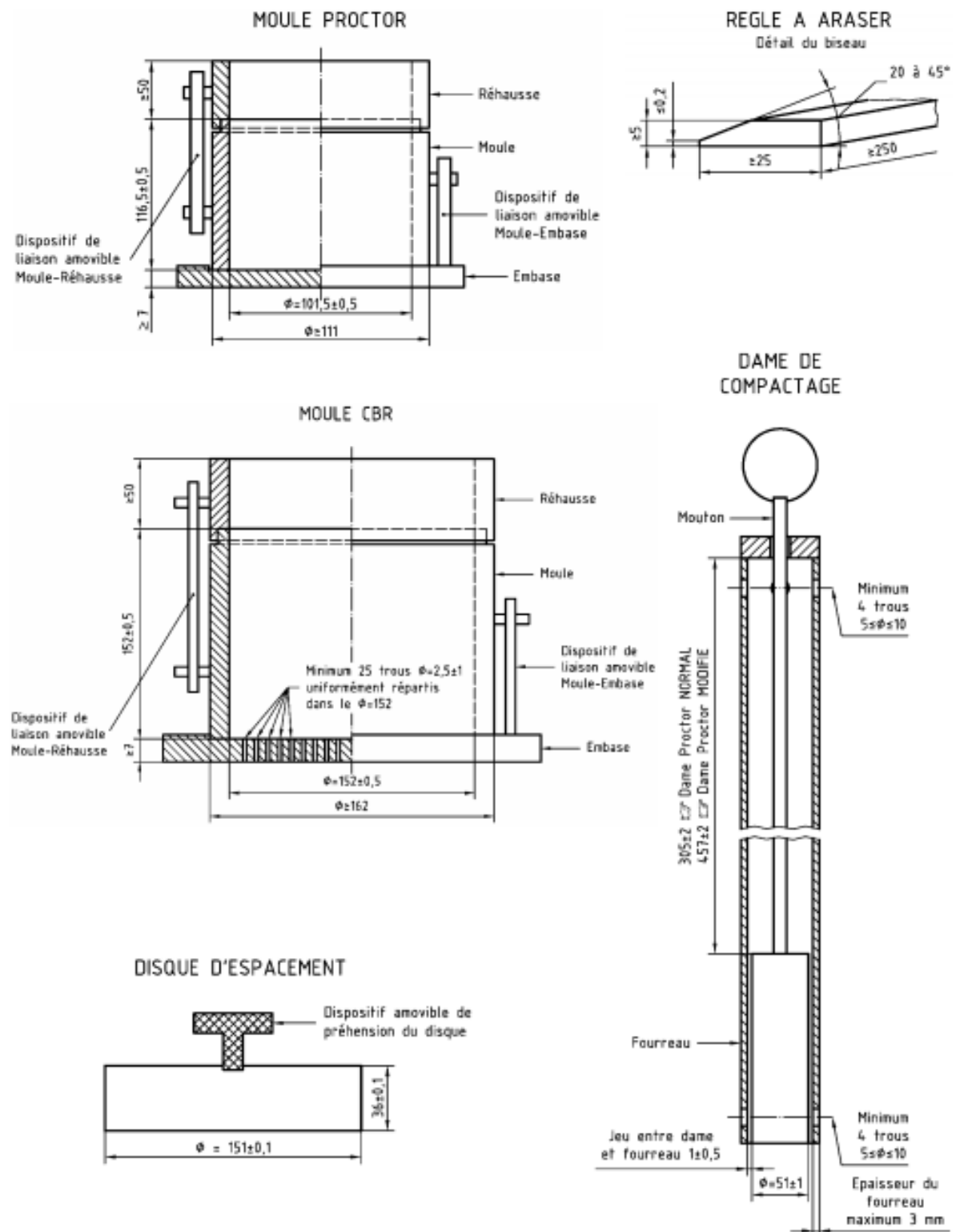


Figure 5.2: Appareillage spécifique

5.2.4. Préparation des échantillons soumis à l'essai

5.2.4.1. Prise d'échantillon

La masse totale de matériau 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 matériau pour la détermination de plusieurs points de la courbe Proctor. Elle varie entre 15 kg et 100 kg suivant la granularité du matériau 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 5.3 précise ces masses. Il s'agit de quantités minimales nécessaires à la détermination de la courbe Proctor en cinq points.

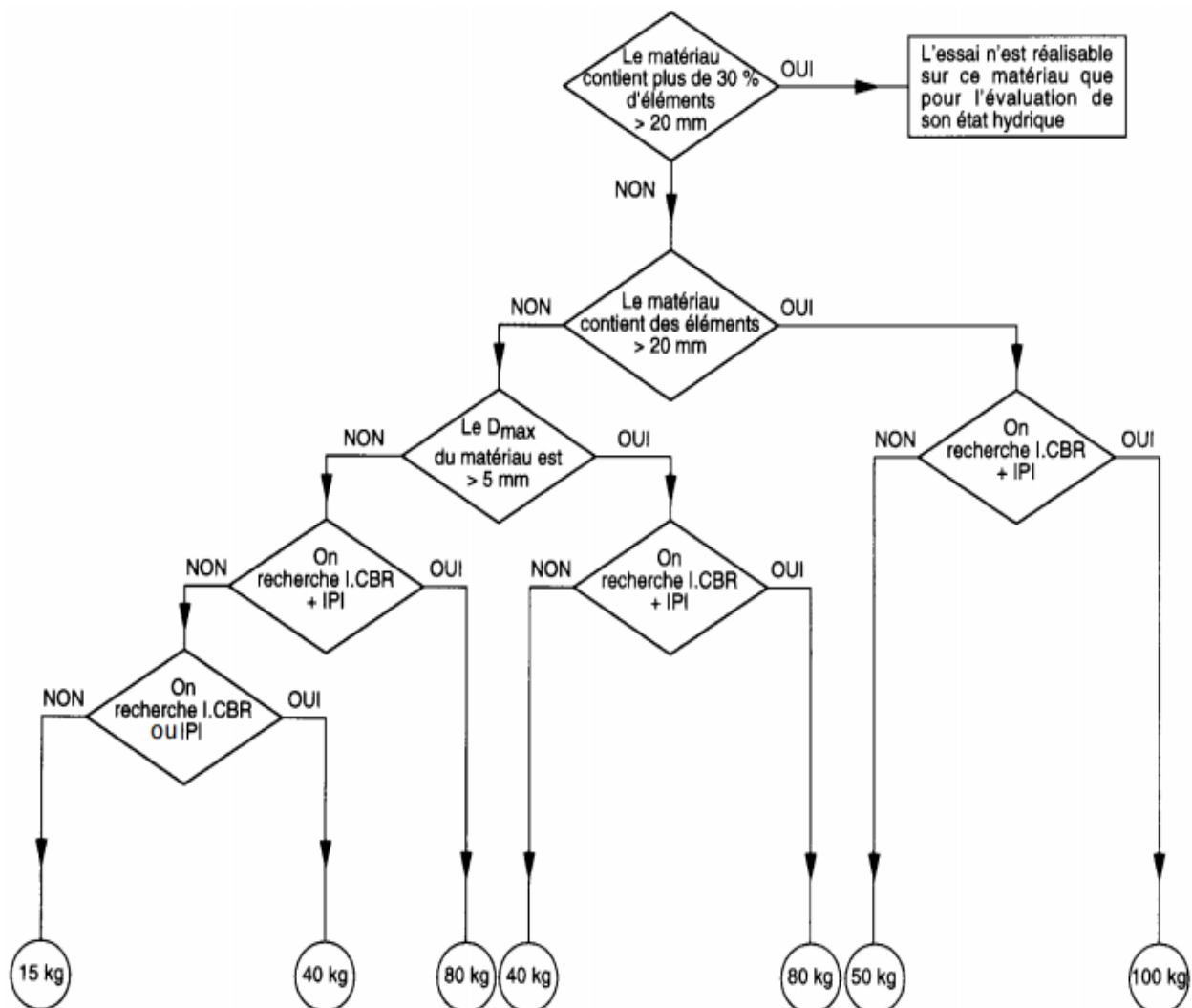


Figure 5.3: Diagramme des quantités minimales de matériau sec nécessaires à l'essai

5.2.4.2. Préparation des éprouvettes

- La totalité du matériau 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 matériau est tamisé à 20 mm et seul le tamisat est conservé pour l'exécution de l'essai.
- Le matériau est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en au moins cinq parts égales.
- Ajouter une quantité d'eau afin que ω de départ soit connue (humidification).
- Après humidification, chaque part est conservée en boîtes ou sacs hermétiques durant un temps fonction de l'argilosité du matériau pour parfaire la diffusion de l'eau.

Remarque : L'humidification de chacune des parts du matériau 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 matériau. 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.

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

5.2.5. Mode opératoire

5.2.5.1. Choix du type de moule

Il est imposé par la granularité du matériau et l'utilisation envisagée des résultats de l'essai comme indiqué sur le diagramme (figure 4).

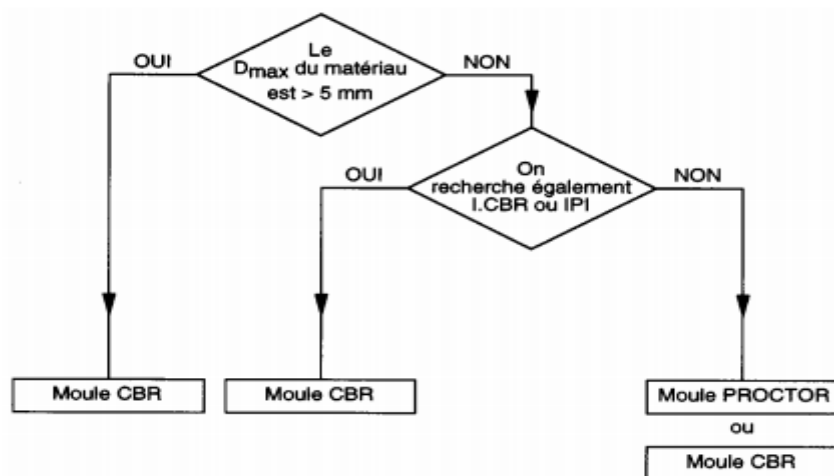
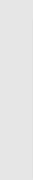


Figure 5.4: Choix du type de moule

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 en section 5.4.2 en respectant les modalités indiquées dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1: Modalité d'exécution des essais Proctor normal et modifié norme (NF P 94-093).

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	3 couches, à raison de : 25 coups par couche  Moule Proctor  Dame Proctor normal 56 coups par couche  Moule CBR
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	5 couches, à raison de : 25 coups par couche  Moule Proctor  Dame Proctor modifié 56 coups par couche  Moule CBR
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

5.2.5.2. Exécution de l'essai

- 1- Peser le moule vide sans la hausse ; P_1
- 2- solidariser : moule, embase et hausse ;
- 3- 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.
- 4- Introduire alors la quantité de matériau 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.
- 5- 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.

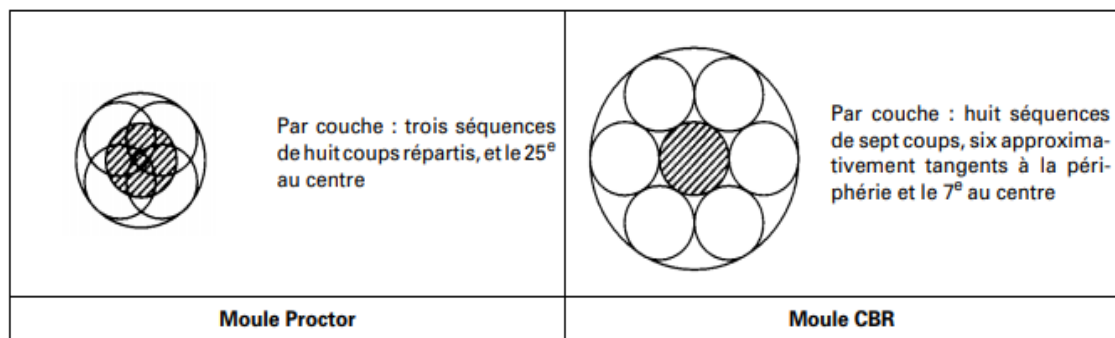


Figure 5.4: Position des coups dans le moule Proctor normal et modifié (Norme NF P 94-093).

- 6- Enlever la hausse du moule et araser au niveau supérieur du moule.
- 7- Peser l'ensemble du moule avec le matériau ; P_2 .
- 8- Prendre une quantité de l'échantillon qui a été arasée pour déterminer la teneur en eau de l'échantillon.
- 9- Répéter l'opération pour chaque teneur en eau testée.



Figure 5.5: Procédure de l'essai du compactage.

5.2.6. Expression des résultats

Le poids volumique sec est obtenu par la formule suivante :

$$\text{On a : } \gamma_h = (P_2 - P_1) / V \text{ et } \gamma_d = \gamma_h / (1 + \omega)$$

$$\text{Donc : } \gamma_d = \frac{P_2 - P_1}{(1 + W) * V}$$

$$\text{On donne aussi : } \gamma_d = \frac{\gamma_s}{\left(1 + \frac{w * \gamma_s}{S_r * \gamma_w}\right)}$$

Avec :

γ_d : Poids volumique sec de l'échantillon ;

γ_h : Poids volumique humide de l'échantillon ;

V : Volume de moule Proctor (**V= 948 cm³**) ;

Sr : degré de saturation (%);

W : Teneur en eau de l'échantillon compacté.

5.3 Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR

- **Indice CBR après immersion,**
- **Indice CBR immédiat,**
- **Indice portant immédiat (IPI).**

5.3.1 Définitions et principe de l'essai

La charge apportée par le pneu sur la chaussée poinçonne le sol de fondation. Ce poinçonnement est d'autant plus petit que l'épaisseur de la chaussée est grande.

On peut reproduire ce phénomène en compactant le matériau dans les conditions de l'essai Proctor dans un moule CBR puis en mesurant les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de ce matériau.

L'Indice Portant Californien est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau à étudier d'une part (avec ou sans immersion au préalable) et dans un matériau type d'autre part. Il caractérise implicitement la tenue au poinçonnement d'un sol.

Indice CBR immédiat : Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau.

Indice CBR après immersion : Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau et soumis à des variations de régime hydrique.

Indice Portant Immédiat : Grandeur utilisée pour évaluer l'aptitude d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter la circulation des engins de chantiers directement sur sa surface lors des travaux ($H = 0 \Rightarrow$ pas de surcharges S).

5.3.2. Équipements nécessaires

5.3.2.1. Matériel de confection des éprouvettes

Il comprend :

- 1- le moule CBR;
- 2- les dames ou machines de compactage Proctor normal et Proctor modifié ;
- 3- l'ensemble des accessoires (plaque de base, rehausse, disque d'espacement, règle à araser);
- 4- le matériel d'usage courant (balances, étuve, bacs,...).

5.3.2.2. Matériel de poinçonnement

Il comprend une presse d'une capacité efficace d'au moins 50 kN et possédant une course d'au moins 10 mm.

Cette presse doit être équipée :

- 1- d'un poinçon cylindrique en acier de $49,6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ de diamètre, soit une section circulaire de $19,32 \text{ cm}^2 \pm 0,08 \text{ cm}^2$, et d'une dizaine de centimètres de longueur minimum;
- 2- d'un dispositif permettant l'enfoncement du poinçon dans le matériau à une vitesse de $1,27 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$;
- 3- d'un dispositif de mesure de l'enfoncement du poinçon garantissant la mesure avec une incertitude absolue maximum de 0,1 mm ;
- 4- d'un dispositif de mesure des efforts de poinçonnement, la capacité de ce dispositif doit être adaptée à l'effort mesuré. Sa précision doit garantir la mesure avec une incertitude relative maximum de 1 %.

5.3.2.3. Matériel de mise en immersion et de mesure du gonflement

Il est constitué :

- 1- d'un ou plusieurs bacs de hauteur suffisante pour assurer l'immersion complète des éprouvettes, tout en ménageant au-dessous de chacune d'elle une lame d'eau d'au moins 10 mm de hauteur;
- 2- d'un disque, dit «de gonflement», métallique ou en matière plastique de 150 mm de diamètre et d'un poids n'excédant pas 300 g environ perforé sur toute sa surface par au moins 25 trous de $3 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre, uniformément repartis, Ce disque comporte, perpendiculairement en son centre, une tige de hauteur réglable, permettant

de réaliser la mise à zéro du dispositif de mesure du gonflement, avant la mise en immersion;

- 3- d'une série d'au moins trois surcharges constituées chacune d'un disque de $150 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre extérieur comportant un évidement central cylindrique de diamètre $54 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ permettant le passage aisé du poinçon. La masse de chaque surcharge doit être de $2,3 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$.
- 4- d'un dispositif permettant la mesure du gonflement avec une incertitude absolue maximum de $0,01 \text{ mm}$; la plage de mesure doit être de 20 mm minimum.



Figure 5.6: Appareillage pour essai CBR

5.3.3. Exécution de l'essai

5.3.3.1 Confection des éprouvettes

- Il convient tout d'abord de choisir les différents ensembles de conditions d'état du sol (masse volumique sèche, teneur en eau, état de saturation), pour lesquels on veut réaliser l'essai.
- Lorsque la dimension maximale des éléments du sol à étudier est inférieure à 20 mm , l'intégralité du sol est soumise à l'essai.
- Si le sol contient des éléments supérieurs à 20 mm dans une proportion inférieure à 30% , ils sont éliminés par tamisage. L'essai est alors réalisé sur la fraction restante.

- Pour chaque ensemble de conditions d'état considère, il convient de préparer, 5,5 kg minimum de matériau dans le cas où l'on recherche l'I.CBR immédiat ou l'IPI et 7 kg minimum de matériau dans le cas où l'on recherche l'I.CBR immersion.
- On précède ensuite à la préparation du sol et au compactage dans les moules suivant les modalités décrites dans la norme NF P 94-093 (section 5.2).
- Dans le cas où l'on détermine l'I.CBR immersion, la teneur en eau de confection de l'éprouvette est déterminée à partir du surplus de matériau, selon une des méthodes normalisées.
- Le moule contenant l'éprouvette est ensuite désolidarisé de sa plaque de base, retourne pour que la face supérieure de l'éprouvette se retrouve en contact avec l'embase. Celle-ci est alors à nouveau solidarisée avec le moule. Procéder à l'extraction du disque d'espacement puis à l'exécution du poinçonnement ou à la mise en immersion selon l'indice recherché.

5.3.3.2 Exécution du poinçonnement

Si l'objet de l'essai est la détermination de l'IPI: placer l'ensemble embase, moule, éprouvette sur la presse, en position centres par rapport au piston de poinçonnement et procéder au poinçonnement de la manière suivante.

- mettre en contact la surface supérieure de l'éprouvette avec le piston;
- initialiser les dispositifs de mesure des forces et des enfoncements;
- exécuter le poinçonnement en maintenant la vitesse de pénétration à $1,27 \text{ mm/min} \pm 0,1 \text{ mm/min}$;
- établir la courbe effort-déformation correspondant au moins, aux enfoncements de 1,25 mm; 2 mm; 2,5 mm; 5 mm; 7,5 mm et 10 mm;
- déterminer la teneur en eau de l'éprouvette selon une des méthodes normalisées.

Si l'objet de l'essai est la détermination de l'CBR immédiat:

- interposer deux surcharges dans le volume libéré par le disque d'espacement. S'il est prévu que la contrainte apportée par la chaussée sur le sol soit supérieure aux 4,6 kg des surcharges ainsi constituées, il y a lieu d'ajouter autant de surcharges que nécessaire.
- L'ensemble moule, plaque de base et surcharges est alors posé sur la presse.

- Exécuter ensuite le poinçonnement comme indiqué précédemment.

Si l'objet de l'essai est la détermination de l'CBR immersion :

- positionner le disque de gonflement sur l'éprouvette avant de mettre en place les surcharges comme indiqué précédemment.
- mettre en place et initialiser le dispositif de mesure de gonflement.
- immerger l'ensemble de sorte que l'éprouvette soit recouverte par une hauteur d'eau d'au moins 20 mm et qu'une lame d'eau d'au moins 10 mm de hauteur soit présente sous le moule.
- Après quatre jours d'immersion (± 2 h), relever la valeur de gonflement total atteint.
- Retirer le moule et l'éprouvette du bac à immersion et après égouttage, exécuter le poinçonnement comme indiqué précédemment.

5.3.4. Expression des résultats

L'indice recherché est par convention la plus grande de ces deux valeurs (max);

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (en kN)}}{13.35} * 100$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN)}}{19.93} * 100$$

5.4. Travail demandé

1. Effectuer un essai de compactage sur un sable de $D_{\max}=5\text{mm}$ (Essai Proctor normal, moule Proctor);
2. Calculer le volume du moule et mesurer son poids vide.
3. Dresser le tableau des résultats pour chaque point effectué.
4. Tracer la courbe $\gamma_d = f(\omega)$.
5. Déterminer le couple $(\omega_{\text{opt}}, \gamma_{d_{\text{opt}}})$ à l'optimum.
6. Dédire la valeur du degré de saturation S_r à l'optimum en sachant que $G_s=2.65$

5.5. Feuille d'essai-Mesure des caractéristiques de compactage

Date :

Nom & prenom:

Groupe :

Tableau 5.2 : Résultats de l'essai de compactage

Teneur en eau; W	4%	6%	8%	10%	12%
Poids du moule; P₁ (g)	4061.5	4061.5	4061.5	4061.5	4061.5
Poids d'échantillons + moule; P₂(g)					
Poids d'échantillons humide P₂-P₁ (g)					
Volume de moule (cm³)	948	948	948	948	948
Poids volumique sec γ_d (g /cm³)					
W_{mesuré} (%)					

Le couple ($w_{opt} = \dots\dots\dots$, $\gamma_{dopt} = \dots\dots\dots$).

5.6.Exemple d'essai- Mesure des caractéristiques de compactage

Les résultats obtenus à partir d'un essai de compactage ont été présentés dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 : Exemple de résultats de l'essai de compactage

Teneur en eau; W	4%	6%	8%	10%	12%
Poids du moule; P₁ (g)	4061.5	4061.5	4061.5	4061.5	4061.5
Poids d'échantillons + moule; P₂(g)	5652.8	5754.1	5855.4	5870.4	5790

Poids d'échantillons humide $P_2 - P_1$ (g)	1591.3	1692.6	1793.9	1808.9	1728.5
Volume de moule (cm³)	948	948	948	948	948
Poids volumique sec γ_d (g/cm³)	1.616	1.679	1.744	1.722	1.613
$W_{\text{mesuré}}$ (%)	3.9	6.3	8.5	10.8	13

Les données de cet essai (Tableau 5.3) sont reproduites dans la Figure 5.7 en vue de déterminer les caractéristiques de compactage.

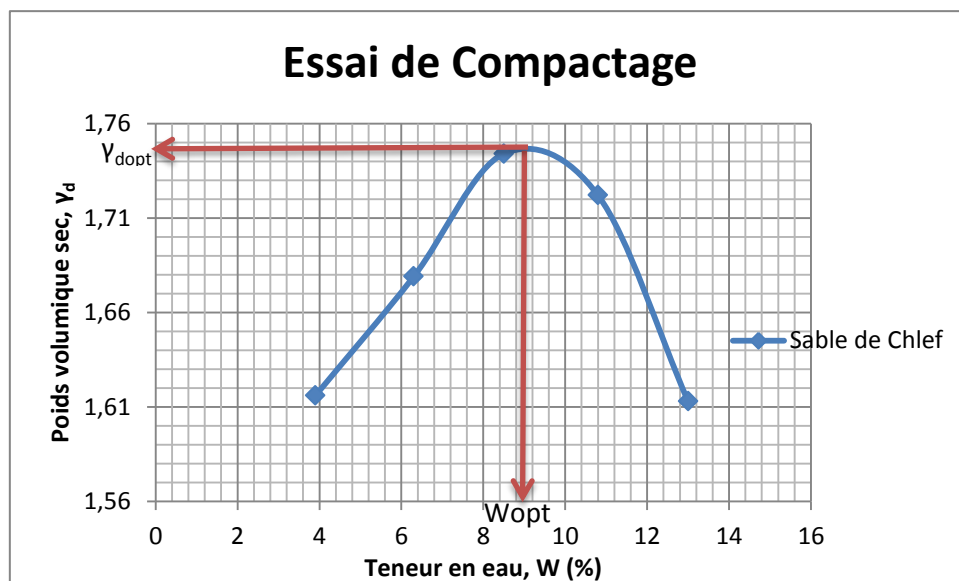


Figure 5.7 : Poids volumique sec en fonction de la teneur en eau

➤ **Détermination des caractéristiques de compactage**

D'après la figure 5.7, on peut constater que le couple ($w_{\text{opt}} = 9\%$ et $\gamma_{d\text{opt}} = 1.746 \text{ gr/cm}^3$).

➤ **Valeur du degré de saturation S_r à l'optimum** : On applique la formule suivante :

$$S_r = \frac{\gamma_d * w * \gamma_s}{(\gamma_s - \gamma_d) * \gamma_w}$$

Alors le degré de saturation à l'optimum de ce sol est : $S_r = 46\%$.

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

6.1. Objectifs de TP

1. Apprendre les différentes étapes à suivre pour effectuer un essai au densitomètre à membrane,
2. Définir des méthodes d'essai pour la détermination de la densité du sol en place (ou in situ).
3. Déterminer la densité sèche par le densitomètre à membrane.

6.2. Mesure de la densité sèche par le densitomètre à membrane

Cette mesure se pratique in situ avec le densitomètre à membrane ou sur une carotte prélevée dans le sol. Dans les deux cas, on mesure une masse volumique humide que l'on convertit en masse volumique sèche de la façon suivante :

- on mesure la teneur en eau du sol en place par la méthode précédente, soit w la teneur en eau;

- on prélève un échantillon de sol de masse m_h , qui se décompose en une masse de grain m_s et une masse d'eau m_w selon la relation [6.1]. Si l'on connaît la teneur en eau w , on peut déterminer la masse d'eau dans l'échantillon [6.2]. Dans la mesure où l'on connaît le volume de l'échantillon V on peut alors déterminer la masse volumique humide [6.3] et en déduire la masse volumique sèche [6.5]. La mesure du volume se fait par la méthode du densitomètre à membrane ou par le volume externe de la carotte :

$$m_h = m_s + m_w \quad [6.1]$$

$$m_w = w \cdot m_s \quad [6.2]$$

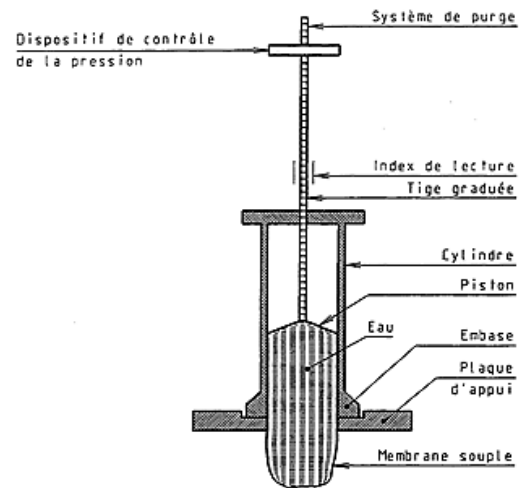
$$\rho_h = \frac{m_h}{V} = \frac{m_s}{V} + w \cdot \frac{m_s}{V} \quad [6.3]$$

$$\rho_h = \rho_d \cdot (1 + w) \quad [6.4]$$

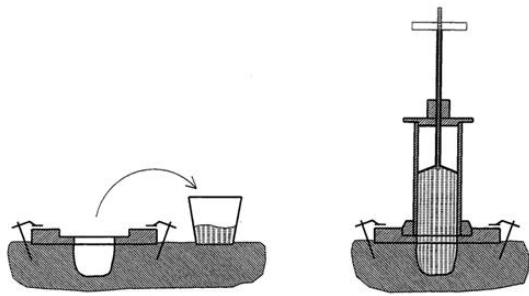
$$\rho_d = \frac{\rho_h}{(1 + w)} \quad [6.5]$$

Le densitomètre est un appareil de mesure de volume de cavité (figure 6.1). Pour son utilisation, on creuse un trou dans le sol dont on veut connaître le volume. L'appareil est rempli d'eau au préalable et une membrane est placée à sa base. On procède comme suit :

- on positionne le densitomètre à la surface du sol à tester après un décapage superficiel ;
- on presse le piston de façon à appliquer la membrane souple sur la surface du sol et on fait une lecture de volume initial ;
- on enlève la partie supérieure de l'appareil en laissant le disque percé (à gauche dans la figure 6.1a) ;
- on réalise le trou dans le sol au diamètre du densitomètre ;
- on pèse le sol extrait et on détermine sa teneur en eau ;
- on positionne à nouveau le densitomètre sur le disque percé ;
- on pousse la membrane dans le trou par appui sur le piston du densitomètre et on fait la lecture de volume final ;
- on détermine le volume du trou par différence des deux volumes ;
- on détermine la masse volumique humide par la relation [6.3] et la masse volumique sèche par la relation [6.5].



(a) Densitomètre à membrane.



(b) Principe de l'essai.

Figure 6.1 : Mesure de la densité par le densitomètre à membrane.

6.3. Mesure de la densité sèche par la méthode de l'excavation en pleine masse

La méthode consiste à réaliser un trou en surface, en mesurant la masse totale humide et la teneur en eau du sol extrait. On bâche ensuite le trou et on le remplit d'eau en mesurant le volume introduit, ce qui permet d'avoir le volume occupé par le sol. La relation [5.5] permet d'avoir la masse volumique sèche.



Figure 6.2 : Mesure de densité des déchets de surface. A gauche : excavation à la pelle. A droite : remplissage du puits excavé et étanché à l'aide d'une citerne d'eau, ADEME (2005).

6.4. Méthode sans prélèvement d'échantillon

Ce sont des méthodes utilisant les sources radioactives qui sont listées ci-après (Agence internationale de l'énergie atomique, 2003) :

- les rayons γ sont fournis par une source radioactive de radium, de béryllium ou de césium 137. Les rayons sont d'autant plus absorbés que le milieu traversé est plus compact ou plus dense. Les rayons qui sont rétrodiffusés par le sol sont mesurés par un compteur Geiger-Muller ;

- les rayons de neutron rapide fournis par une source radioactive d'américium 241 et de béryllium, sont d'autant plus ralentis que le milieu est riche en atomes d'hydrogène. Comme l'eau est le matériau présent dans le sol qui est le plus riche en hydrogène, on considère que ces mesures sont adaptées à la mesure de la teneur en eau du sol. Les compteurs à neutron lents permettent de mesurer l'humidité du milieu.

Les mesures se font par rétrodiffusion (figure 6.4) ou transmission en surface (figure 6.5), en forage ou entre deux forages. L'appareil est étalonné au préalable dans des matériaux de référence dont la compacité ou la teneur en eau est connue. La différence de réception des rayons γ ou des neutrons entre le matériau de référence et le sol est introduite dans un abaque qui fournit alors la densité ou la teneur en eau du sol. Le volume testé est de l'ordre du dm^3 .

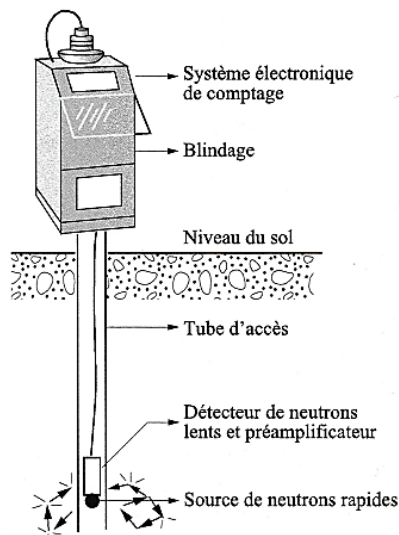


Figure 6.3 : Sonde à neutron de profondeur
(source : Campbell Pacific Nuclear).

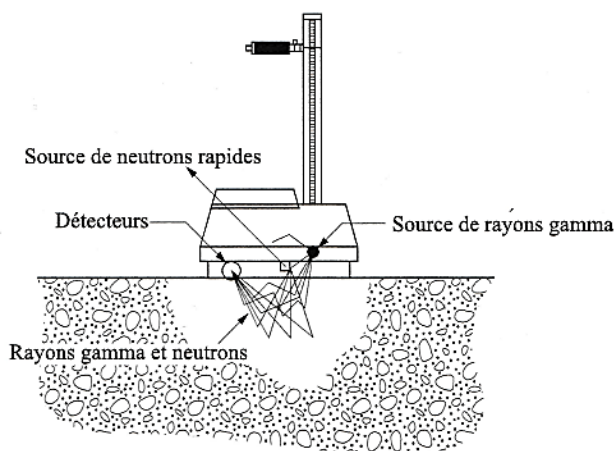


Figure 6.4 : Sonde en position de mesure de la teneur en eau et de la densité de la couche superficielle du sol (source : CPN MC-3 Portaprobe).

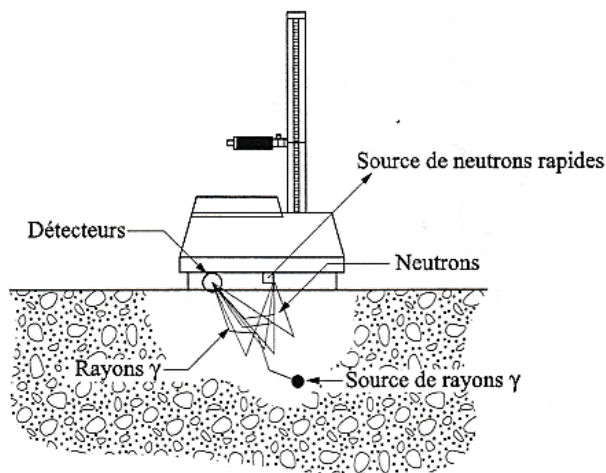


Figure 6.5 : Sonde en position de mesure de la teneur en eau et de la densité dans la couche entre la source radioactive et le détecteur (source : CPN MC-3 Portaprobe).

6.5. Travail demandé

Pour l'objet de mesure de la densité in-situ, effectuer un essai au densitomètre à membrane ;

1. Presser le piston de façon à appliquer la membrane souple sur la surface du sol, puis lis la lecture de volume initial ;
2. Réaliser un trou dans le sol au diamètre du densitomètre et détermine sa teneur en eau.
3. Positionner à nouveau le densitomètre sur le disque percé et on fait la lecture de volume final ;
4. Déterminer la masse volumique humide.
5. Déduire la masse volumique sèche.

6.6. Feuille d'essai- Mesure de la densité in-situ (essai au densitomètre à membrane)

Date :

Nom & prenom:

Groupe :

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

Tableau 6.1 : Résultats de l'essai au densitomètre à membrane

volume initial, V_i (cm ³)	
volume final, V_f (cm ³)	
Volume d'échantillons, ΔV (cm ³)	
Masse du sol extrait du trou	
Masse du sol humide, m_h (gr), pour mesuré la teneur en eau	
Masse du sol sec, m_d (gr), pour mesuré la teneur en eau	
Teneur en eau, W (%)	
Masse volumique humide, ρ_h (gr/cm ³)	
Masse volumique sec, ρ_d (gr/cm ³)	

6.7. Exemple d'essai- Mesure de la densité in-situ (essai au densitomètre à membrane)

Les résultats obtenus à partir d'un essai de mesure de la densité in-situ (essai au densitomètre à membrane ont été résumés dans le tableau 6.2.

Tableau 6.2 : Exemple de résultats de l'essai au densitomètre à membrane

volume initial, V_i (cm ³)	160
volume final, V_f (cm ³)	1275
Volume d'échantillons, ΔV (cm ³)	1115
Masse du sol extrait du trou	2158
Masse du sol humide, m_h (gr), pour mesuré la teneur en eau	25.62
Masse du sol sec, m_d (gr), pour mesuré la teneur en eau	24.86
Teneur en eau, W (%)	3.06

Masse volumique humide, ρ_h (gr/cm ³)	1.935
Masse volumique sec, ρ_d (gr/cm ³)	1.878

Alors la densité in-situ (essai au densitomètre à membrane) de ce sol est : $\rho_d = 1.878$ (gr/cm³).

7. TP 6 : Détermination des masses volumiques sèches minimale et maximale des sables ($d_{\max} < 5 \text{ mm}$)

7.1. Objectifs de TP

1. Apprendre les étapes à suivre pour déterminer les masses volumiques sèches minimale et maximale des sables ($d_{\max} < 5 \text{ mm}$).
2. Déterminer les masses volumiques sèches minimale et maximale d'un sable dont le diamètre maximal des grains est inférieur à 2 mm.
3. Dédire l'indice des vides minimal et maximal du sable

7.2. Équipement nécessaire

- Une balance
- Une règle à araser
- Un moule cylindrique rigide de volume connu. Les dimensions du moule choisi dépendent de la taille des plus grosses particules du matériau. Pour les matériaux ayant un diamètre maximal des grains inférieure à 5 mm ($d_{\max} < 5 \text{ mm}$), il est préféré d'utiliser un moule de 100 mm de diamètre.
- Hausse du moule adaptable avec le moule.
- Un entonnoir qui doit être grand pour qu'il puisse contenir suffisamment de sable pour remplir le moule. L'extrémité de l'entonnoir est attachée avec un tube dont le diamètre doit être inférieur à 12.5 mm (pour $d_{\max} < 5 \text{ mm}$).
- Une dame pour compacter l'échantillon, tels que la dame Proctor.
- Pinceau

7.3. Préparation de l'échantillon

Après le séchage du sable à tester, il faut le malaxer délicatement afin de l'homogénéiser. Puis, on prend une quantité nécessaire pour l'essai. Pour les matériaux qui ont un diamètre maximal $d_{\max} < 5 \text{ mm}$, la masse requise doit être supérieure ou égale à 7.5 kg.

7.4. Mode opératoire

7.4.1 Détermination de la masse volumique minimale

1. Peser le moule choisi.
 2. Placer l'entonnoir dans l'axe du moule et assurer que la base du tube est en contact avec le fond du moule (voir figure 7.1).
 3. Verser dans l'entonnoir une quantité de sable suffisante pour remplir le moule et former un excédent conique au-dessus du niveau supérieur de moule.
 4. Déposer toute la quantité de sable en soulevant l'entonnoir verticalement tout en maintenant la hauteur de chute quasi-nulle, et jusqu'à ce que l'entonnoir soit vide (voir figure 7.1).
 5. Retirer le sable surmontant le niveau supérieur du moule à l'aide d'une règle à araser tout en évitant la densification du sable.
 6. Nettoyer la surface extérieure du moule à l'aide d'un pinceau
 7. Peser le moule et son contenu.
- ☞ L'essai comprend au moins cinq prises d'essai.

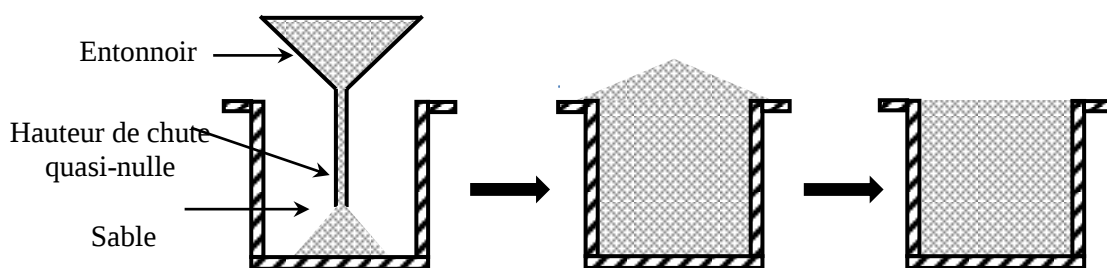


Figure 7.1 : Méthode de déposition du sable utilisée pour déterminer sa masse volumique minimale.

7.4.2 Détermination de la masse volumique maximale

1. Peser le moule (le même moule utilisé pour la détermination de la masse volumique minimale)
2. Monter la hausse cylindrique sur le moule
3. Déposer le sable sec en couche jusqu'à ce que le niveau supérieur du moule soit dépassé. En utilisant une dame rigide (comme la dame Proctor), chaque couche subit 25 coups, 24 coups circulaires le long de son périmètre et un coup au milieu (voir figure 7.2).

4. Retirer la hausse cylindrique
 5. Retirer le sable surmontant le niveau supérieur du moule en utilisant une règle à araser
 6. Nettoyer la surface extérieure du moule à l'aide d'un pinceau
 7. Peser le moule et son contenu.
- ☞ L'essai doit comporter au moins deux prises d'essai.

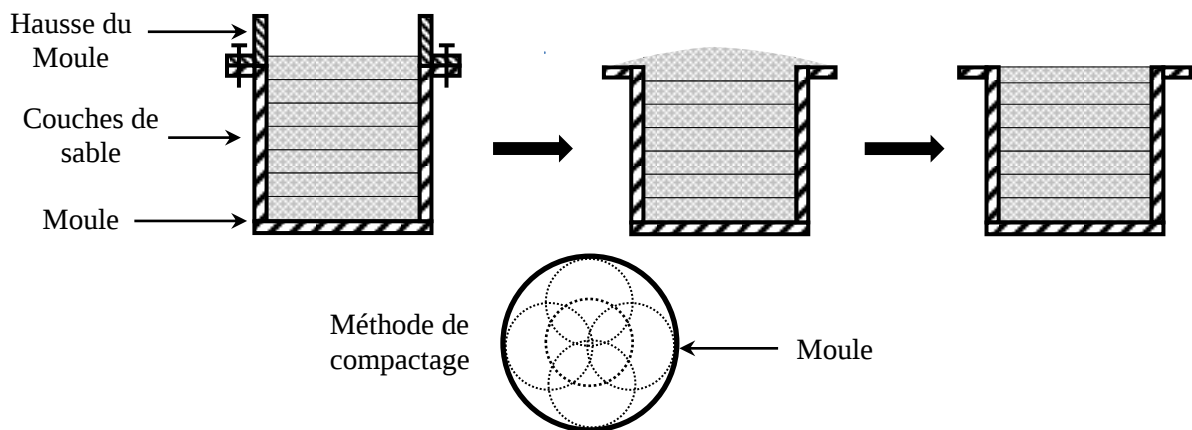


Figure 7.2 : Méthode de déposition du sable utilisée pour déterminer sa masse volumique maximale.

7.5. Résultats

La masse volumique sèche du sable est calculée comme suit :

$$\rho_d = m_d / V_m$$

$$\text{et } m_d = m - m_m$$

où :

ρ_d est la masse volumique sèche ; m_d est la masse du sable sec ; m_m est la masse du moule ; m est la masse du moule et son contenu ; V_m est le volume du moule.

La valeur finale de la masse volumique sèche minimale (ρ_{dmin}) du sable est la moyenne des valeurs de ρ_{dmin} obtenues. De même, il faut calculer la moyenne des valeurs de ρ_{dmax} pour obtenir la valeur finale de la masse volumique sèche maximale du sable.

En utilisant les valeurs finales des masses volumiques sèches minimale et maximale, il est possible de déduire les indices des vides minimal et maximal comme suit:

$$e_{min} = (\rho_s / \rho_{dmax}) - 1 \quad \text{et} \quad e_{max} = (\rho_s / \rho_{dmin}) - 1$$

où :

$e_{\min}$ est l'indice des vides minimale ; $e_{\max}$ est l'indice des vides maximale ; ρ_s est la masse volumique des particules solides.

7.6. Travail demandé

1. Déterminer les masses volumiques sèches minimale et maximale d'un sable dont le diamètre de ses particules compris entre 0.08 mm et 2 mm.
2. Déduire les indices des vides minimale et maximale du sable avec $\rho_s = 2.65 \text{ gr/cm}^3$.
3. Commenter les résultats.

7.7. Feuille d'essai- Détermination des masses volumiques sèches minimale et maximale des sables

Date :

Nom & prenom:

Groupe :

Tableau 7.1 : Résultats de l'indice des vides maximal

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Masse du moule, m_m (gr)					
Masse totale, m_t (gr)					
Masse du sol sec m_d (gr)					
Volume du moule, V_m (cm³)					
$\rho_{d\min}$					
$e_{\max}$ (-)					
$e_{\max \text{ moy}}$ (-)					

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

Tableau 7.2 : Exemple de résultats de l'indice des vides minimal

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Masse du moule, m_m (gr)					
Masse totale, m_t (gr)					
Masse du sol sec m_d (gr)					
Volume du moule, V_m (cm³)					
ρ_{dmax}					
e_{min} (-)					
e_{min} moy (-)					

7.8. Exemple d'essai- Détermination des masses volumiques sèches minimale et maximale des sables

Les résultats obtenus à partir d'un essai de des masses volumiques sèches maximale et minimale (e_{min} et e_{max}) ont été présentés dans les tableaux (7.3 et 7.4), respectivement.

Tableau 7.3 : Exemple de résultats de l'indice des vides maximal

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Masse du moule, m_m (gr)	671.3	671.3	671.3
Masse totale, m_t (gr)	1179.7	1181.1	1180.3
Masse du sol sec m_d (gr)	508.4	509.8	509
Volume du moule, V_m (cm³)	343.75	343.75	343.75
ρ_{dmin} (gr/cm³)	1.479	1.483	1.48

$e_{\max}$ (-)	0.792	0.787	0.79
$e_{\max \text{ moy}}$ (-)	0.789		

Tableau 7.4 : Exemple de résultats de l'indice des vides minimal

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Masse du moule, m_m (gr)	671.3	671.3	671.3
Masse totale, m_t (gr)	1258.3	1260.2	1257
Masse du sol sec m_d (gr)	587	588.9	585.7
Volume du moule, V_m (cm³)	343.75	343.75	343.75
$\rho_{d\max}$ (gr/cm³)	1.708	1.713	1.704
$e_{\min}$ (-)	0.552	0.547	0.555
$e_{\min \text{ moy}}$ (-)	0.551		

Avec ρ_s est la masse volumique des grains solides : $\rho_s = 2.65 \text{ gr/cm}^3$.

Alors les indices des vides maximal et minimal de ce sol sont : ($e_{\max} = 0.789$ et $e_{\min} = 0.551$), respectivement.

8. TP 7 : Perméabilité des sols : essai de perméabilité à charge constante ; essai de perméabilité à charge variable

8.1. Objectifs de TP

1. Détermination du coefficient de perméabilité k (ou la conductivité hydraulique) des différents sols en utilisant la loi de Darcy.
2. Apprendre la différence entre l'essai de perméabilité à charge constante et variable.
3. Corriger les valeurs mesurées de k pour standardiser la perméabilité à une température standard de 20°C.

8.2. Définition

La perméabilité des sols est considérée comme l'un des paramètres qui caractérise le comportement hydraulique des sols. Elle dépend :

- De la nature du sol (diamètre des grains solides et diamètres des pores) ;
- La distribution dimensionnelle des grains (granulométrie) ;
- Caractéristiques du fluide (viscosité et température de l'eau) ;
- L'indice des vides ;
- Le degré de saturation ;
- La méthode de la reconstitution du sol.

8.3. Notions

- La perméabilité d'un sol est une mesure de sa capacité à permettre l'écoulement d'un fluide (l'eau) à travers lui.
- Le gradient hydraulique i est définie comme la perte de charge Δh par unité de longueur l ($i = \Delta h / l$).
- Dans le cas des écoulements laminaires, le débit d'écoulement Q (m^3/s) est proportionnel au gradient hydraulique i , et la formule qui relie entre les deux paramètres est connue par la loi de Darcy :

$$Q = k i A \quad (8.1)$$

Avec :

- A (m^2) est la section de l'échantillon normale à la direction de l'écoulement ;

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

- k (m/s) est le coefficient de perméabilité ou la conductivité hydraulique est exprimé en mètre par seconde ;
- i est le gradient hydraulique (sans unité) ;
- Q (m^3/s) est le débit d'écoulement.

Tableau 8.1 : Quelques valeurs typiques de la conductivité hydraulique (Delleur, 1999).

Type de sol	Conductivité hydraulique k , cm/s	Type de sol	Conductivité hydraulique k , cm/s
Gravier propre	1.0 et plus	Sable limoneux	0.002–0.0001
Sable propre (grossier)	1.0–0.01	Limon	0.0005–0.00001
Sable (mélanges)	0.01–0.005	Argile	0.000001 et plus petit
Sable fin	0.05–0.001		

8.4. Équipements nécessaires

- Dispositif du perméamètre (à charge constante où variable) : ce dispositif contient les composants principaux suivants (figure 8.1):
 - a. Une cellule
 - b. Un réservoir à charge constante
 - c. Un tube de faible diamètre
 - d. Une source d'eau (Un grand réservoir, robinet d'eau)
- Tube gradué ;
- Chronomètre ;
- Thermomètre ;

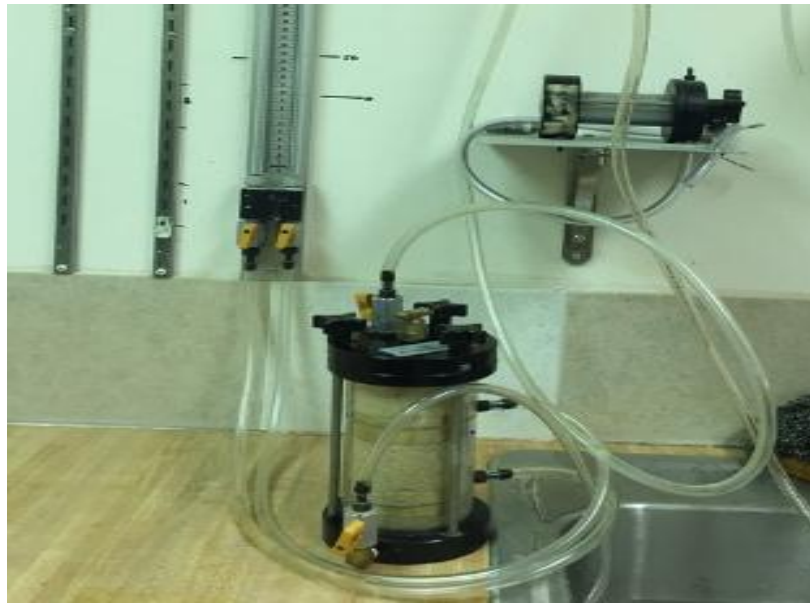


Figure 8.1 : Dispositif du perméamètre

8.5. Essai à charge constante

8.5.1. Principe de l'essai

L'essai de perméabilité à charge constante est utilisé pour mesurer la conductivité hydraulique des sols pulvérulents ou assez perméables (tels que le gravier et le sable ...etc).

8.5.2. Mode opératoire

- ❖ Calculer la masse du sol nécessaire pour remplir le volume de la cellule en imposant la densité initiale de l'échantillon.
- ❖ Déposer le sol dans la cellule, et puis fermer bien la cellule.
- ❖ Saturer l'échantillon à l'aide du réservoir en ouvrant le robinet du bas de la cellule de sorte que l'écoulement soit laminaire. Il peut être estimé que l'échantillon est saturé lorsqu'il n'y a plus de bulles d'air sortantes de l'échantillon.
- ❖ Prendre les mesures en collectant l'eau sortante de l'échantillon dans un tube gradué pour une période de temps donnée t , à titre d'exemple 30s, 60s, 90s ...etc (figure 8.2a).
- ❖ Calculer le coefficient de perméabilité k en utilisant la formule suivante :

$$k = \frac{q \cdot L}{h \cdot A \cdot t} \quad (8.2)$$

Avec :

q : le volume d'eau recueilli pendant le temps t (m^3 , s) ; A : la section de l'échantillon (m^2) ; L : la longueur de l'échantillon (m) ; h : la perte de charge piézométrique à travers l'échantillon (m).

- ❖ Faire trois mesures de volume pour trois intervalles de temps différents, puis calculer la moyenne des trois valeurs de k .
- ❖ Mesurer la température T ($^{\circ}C$) de l'eau sortant de l'échantillon pour chaque essai, puis calculer la moyenne des trois valeurs.

8.6. Essai à charge variable

8.6.1. Principe de l'essai

A l'inverse du premier essai, l'essai de perméabilité à charge variable est utilisé pour mesurer le coefficient de perméabilité des sols peu perméables (à titre d'exemple : le limon et l'argile).

Un échantillon de sol est placé dans un moule cylindrique ayant une section A et une hauteur L , qui est en contact d'une part à un tube gradué ayant une section s , servant à alimenter l'échantillon par l'eau, et d'autre part avec un tube de collecte de l'eau dégagée du moule. L'échantillon est saturé au préalable par l'eau. L'eau dans le tube circule dans l'échantillon et on mesure le temps t nécessaire pour une baisse du niveau d'eau dans le tube de h , qui est d'ailleurs la perte de charge.

On remarque que le niveau d'eau baisse avec une vitesse suffisamment lente, ce qui permet de supposer que le régime d'écoulement est permanent et appliquer ainsi la loi de Darcy.

La continuité d'écoulement exige que le volume d'eau entrant soit égal à celui sortant.

8.6.2. Mode opératoire

- ❖ Refaire les deux premières étapes mentionnées dans le mode opératoire de la section 8.5.
- ❖ Déposer la cellule dans un bac, et puis remplir le bac par l'eau distillé jusqu'à le trop-plein.
- ❖ Ouvrir la valve du haut de la cellule pour laisser l'eau de s'écouler vers le haut à travers l'échantillon. Il peut être estimé que l'échantillon est saturé lorsqu'il n'y a plus de bulles d'air sortantes de l'échantillon, puis, on ferme la valve (la phase de saturation peut durer 24 heures ou plus).

- ❖ Connecter le haut de la cellule avec un tube de faible diamètre.
- ❖ Remplir le tube jusqu'à le niveau 1 (h_1).
- ❖ Ouvrir la valve du haut de la cellule, et puis mesurer le temps t nécessaire pour que l'eau descendre du niveau 1 (h_1) au 2 (h_2) (figure 8.2b).
- ❖ Calculer le coefficient de perméabilité k en utilisant la formule suivante :

$$k = \left(\frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \right) \cdot \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (8.3)$$

Avec :

A, L : section et hauteur de l'échantillon (m^2, m) ; a : section de tube (m^2) ; Δt : temps nécessaire pour que le niveau d'eau diminue de h_1 à h_2 (m).

- ❖ Faire trois mesures en remplissant le tube à chaque fois.
- ❖ Mesurer la température T ($^{\circ}C$) de l'eau sortant de l'échantillon pour chaque essai, puis calculer la moyenne des trois valeurs.

8.7. Standardiser les valeurs mesurées de k

Il est recommandé de relier les valeurs de perméabilité mesurées à une température standard de $20^{\circ}C$ pour qu'on puisse comparer les résultats. Si un test de perméabilité effectué à $T^{\circ}C$ donne un coefficient de perméabilité, k_T , la valeur correspondante à $20^{\circ}C$, k_{20} est calculée à partir de la formule suivante :

$$k_{20} = k_T \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (8.4)$$

Remarque : la variation du η_T / η_{20} avec la température T est présentée dans la figure 8.3.

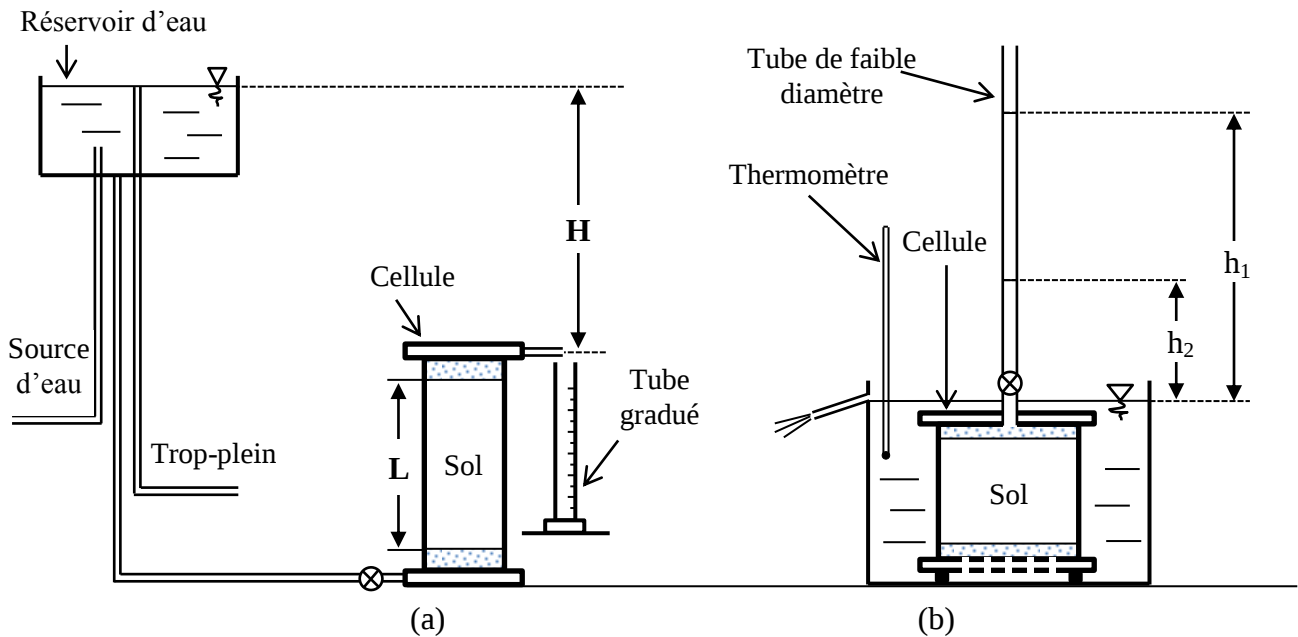


Figure 8.2 : Principe du perméamètre : (a) essai à charge constante; (b) essai à charge variable.

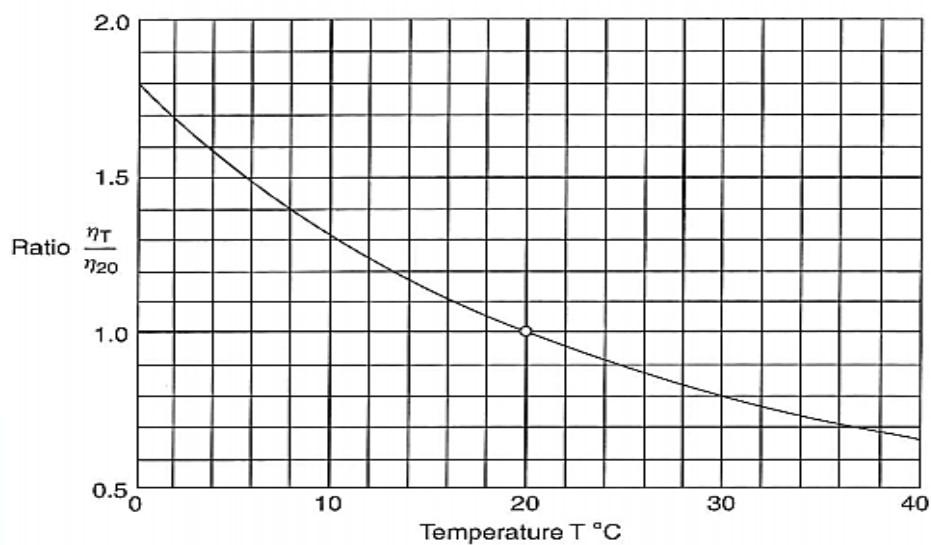


Figure 8.3 : Relation entre la viscosité dynamique de l'eau et la température (basé sur les données de Kaye et Laby, 1973, figure à partir de Head et Epps, 2011).

8.8. Travail demandé

- Mesurer le coefficient de perméabilité d'un sable moyennement dense ($D_r=50\%$).
- Calculer le coefficient k de deux matériaux correspondant à la température de 20°C .
- Commenter les résultats.

8.9. Feuille d'essai- Détermination de la perméabilité d'un sable

Date :
Nom & prenom:
Groupe :

Tableau 8.2 : Résultats d'un essai de perméabilité.

Longueur de l'échantillon, L (cm)			
Section de l'échantillon, A (cm ²)			
Perte de charge piézométrique, h (cm)			
Temps, t (s)	30 s	60 s	90 s
Température, T (C°)			
Volume d'eau, q (cm ³)			
Coefficient de perméabilité, k (cm/s)			
k moyenne ou k _T (cm/s)			
Viscosité dynamique de l'eau, η_T / η_{20}			
Perméabilité à une température standard de 20°C, k ₂₀ (cm/s)			

8.10. Exemple d'essai- Détermination de la perméabilité d'un sable

Les résultats obtenus à partir d'un essai de perméabilité à charge constante ont été montrés dans le tableau 8.3.

➤ **Données de l'essai :**

$e_{\max}=0.789$, $e_{\min}= 0.551$, $D=10.16$ cm, $L=11.65$ cm, $V=944.02$ cm², $Dr=20\%$, $m=1436.75$ gr.

Tableau 8.3 : Exemple de résultats d'un essai de perméabilité.

Longueur de l'échantillon, L (cm)	11.65		
Section de l'échantillon, A (cm²)	81.03		
Perte de charge piézométrique, h (cm)	176		
Temps, t (s)	30 s	60 s	90 s
Température, T (C°)	23	23	23
Volume d'eau, q (cm³)	230	445	720
Coefficient de perméabilité, k (cm/s)	$6.26 \cdot 10^{-3}$	$6.05 \cdot 10^{-3}$	$6.53 \cdot 10^{-3}$
k moyenne ou k_T (cm/s)	$6.28 \cdot 10^{-3}$		
Viscosité dynamique de l'eau, η_T / η_{20}	0.95		
Perméabilité à une température standard de 20°C, k_{20} (cm/s)	$5.97 \cdot 10^{-3}$		

- **Remarque :** on a déterminé la viscosité dynamique de l'eau, ($\eta_T / \eta_{20} = 0.95$) à partir de la figure 8.3.
- **Commentaire de résultats :** on a trouvé que le coefficient de perméabilité, $k = 5.97 \cdot 10^{-3}$ (cm/s), donc on peut classer ce sol comme un sable limoneux ($0.002 \text{ cm/s} < k < 0.0001 \text{ cm/s}$).

9. TP 8 : Essai de compressibilité à l'œdomètre

9.1. Objectifs de TP

1. Apprendre les différentes étapes d'un essai de compressibilité à l'œdomètre.
2. Exprimer les résultats obtenus à partir d'un essai œdométrique, effectué sur un échantillon de sable, en traçant les courbes de consolidation et celles de compressibilité
3. Déterminer les paramètres de compressibilité de cet échantillon à partir de la courbe de compressibilité.
4. A l'issue de ce TP l'étudiant sera capable de faire la différence entre une courbe de compressibilité et celle de consolidation.

9.2. Introduction

La consolidation d'un sol fin saturé (argile, limon, marne, etc) se manifeste par une déformation au fur et à mesure de l'évacuation de l'eau interstitielle, suite à l'application d'une surcharge en surface du sol. Ce phénomène s'exprime par une évolution du tassement dans le temps. La théorie la plus utilisée actuellement pour analyser le phénomène est celle de Terzaghi-Rendulic, vue sa simplicité, bien que ses hypothèses sont grossières et ne décrivent pas le comportement réel du sol. L'essai œdométrique consiste à soumettre l'échantillon à une série de pressions verticales et de suivre l'évolution des déformations verticales du matériau dans le temps, sous une surcharge donnée, à l'aide des comparateurs. Du fait que l'échantillon est installé dans un moule rigide, les déformations horizontales sont empêchées (voir figure 9.1). Un tel type d'essai représente le tassement d'une couche de faible hauteur soumise à une surcharge de grande surface. Dans le cas où la surcharge est ponctuelle, cet essai devient irréaliste, car dans ce cas les déformations horizontales du sol sont non négligeables.

L'œdomètre est le dispositif qui permet de réaliser des essais de compressibilité sur différents sols (intacts ou pulvérulants) afin d'évaluer leur déformation axiale sous le poids des charges appliquées et déterminer leurs caractéristiques de compressibilité.

2.3 Principe de l'œdomètre

L'essai s'effectue sur un échantillon de sol saturé d'eau placé entre deux pierres poreuse dans une enceinte cylindrique rigide. La partie supérieur de l'échantillon est soumis à une série des

charges verticales (N) croissantes et décroissantes à l'aide d'un piston et les variations de la hauteur d'échantillon résultantes doit être mesurées au cours d'application de chaque chargement (figure 9.1).

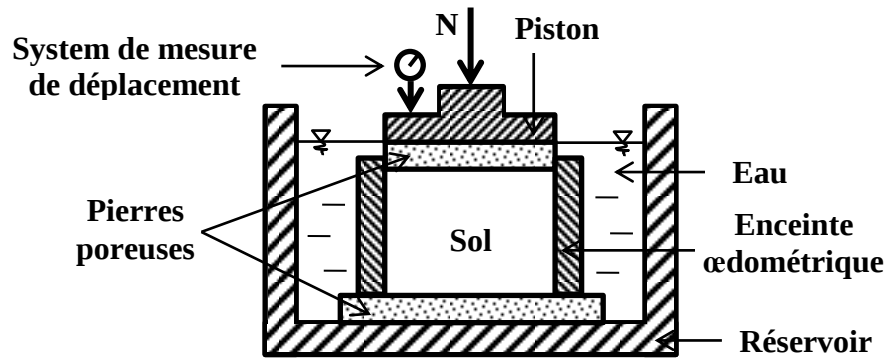


Figure 9.1 : Principe de l'œdomètre

2.4. Dispositif et équipement nécessaire

Le dispositif, utilisé pour effectuer l'essai œdométrique, comprend les composantes de base suivantes (figure 9.2):

- Le bâti
- La cellule œdométrique, elle comporte les éléments suivants :
 - Une enceinte cylindrique rigide ou une bague œdométrique, elle reçoit l'échantillon de sol et prévient son déplacement horizontal.
 - Un réservoir d'eau, il reçoit l'enceinte cylindrique et il sert à immerger l'échantillon avec l'eau
 - Un piston rigide
 - Deux pierres poreuses, elles sont reliées à des orifices pour la circulation des fluides
- Le dispositif d'application de la charge vertical, l'effort vertical est appliqué au moyen des masses fendues, et il est transmis à l'échantillon par un levier rigide prenant appui sur la tête du piston.
- Le système de mesure, il peut être un comparateur (ou un capteur) et il sert à mesurer les variations de la hauteur de l'éprouvette résultantes de la charge verticale appliquée.
- Chronomètre.



Figure 9.2 : Dispositif de l'œdomètre

9.5. Préparation de l'échantillon

Pour les sols fins cohérents, l'échantillon est prélevé en utilisant la bague œdométrique munie d'une trousse coupante amovible, ou il doit être soigneusement taillé aux dimensions de l'enceinte cylindrique. Puis, il faut araser l'échantillon sur les deux faces parallèles de l'enceinte cylindrique (ou la bague) avant de le peser. La teneur en eau de l'échantillon peut aussi être mesurée en utilisant les fragments de sol restants après la préparation.

La hauteur initiale H_i de l'éprouvette doit respecter les conditions suivantes :

$$10 \text{ mm} \leq H_i \quad \text{et} \quad 6 d_{\max} \leq H_i \leq 0.4 D$$

Avec $d_{\max}$ est le diamètre des grains solides constituant l'échantillon et D est le diamètre de l'enceinte œdométrique.

Pour les sols pulvérulents, voir la section 9.6 a.

9.6. Mode opératoire

a. Mise en place de l'éprouvette :

Pour les sols cohérents, après que l'échantillon est pesé, il est introduit avec sa bague (ou l'enceinte cylindrique) dans la cellule œdométrique entre les deux pierres poreuses. Ensuite, le piston est mis sur la pierre poreuse supérieure.

Si le sol testé est pulvérulent, l'échantillon est déposé directement dans la cellule œdométrique sur la plaque drainante inférieure, puis, sa face supérieure est arasée. Ensuite, la plaque drainante supérieure est placée sur la face supérieure de l'échantillon suivie par le piston. La masse initiale de sol, nécessaire pour remplir le volume désiré, peut être calculée en proposant la densité initiale de l'échantillon ou en pesant la cellule œdométrique avant et après la mise en place de l'échantillon.

- b. Placer la cellule œdométrique sur le bâti.
- c. Placer le dispositif d'application de la charge vertical.
- d. Mettre en place le capteur (ou le comparateur) et puis régler le à zéro.
- e. Remplir le réservoir d'eau, et puis observer les variations de la hauteur d'échantillon.
- f. Attendre la stabilisation du capteur (ou comparateur) afin qu'on puisse déterminer la hauteur de l'échantillon après la saturation (et avant le chargement).
- g. Remettre le capteur (ou le comparateur) à zéro.
- h. Effectuer une série de paliers de chargements croissants : la loi de chargement à suivre dépend de la nature de l'échantillon de sol et son comportement en présence d'eau. La charge verticale N est appliquée en plaçant des masses fendues sur le plateau de chargement. Pour chaque palier de chargement, le déplacement verticale de l'échantillon (ΔH) est mesuré en fonction du temps jusqu'à la stabilisation (au moins 24h pour les sols cohérents).
- i. Appliquer une série de déchargement en enlevant les masses fendues placées sur le plateau de chargement. Il faut toujours mesurer les variations de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps jusqu'à la stabilisation, ou la fin de consolidation) pour chaque palier de chargement (voir figure 9.3).
- j. Effectuer une nouvelle série de chargement.
- k. Enlever le dispositif de chargement, Récupérer l'échantillon de sol, peser le et déterminer sa teneur eau après l'essai.

1. Nettoyer la cellule œdométrique.

9.7. Traitement des résultats

1. Calculer les paramètres suivants :

- L'indice des vides initiale e_i
- La contrainte verticale σ_v (ou axiale) appliquée à l'éprouvette pour chaque palier de chargement et déchargement :

$$\sigma_{v(n)} = N_{(n)} / A$$

où : N est l'effort vertical et A est la surface de l'échantillon

- L'indice des vides e_n de l'échantillon à la fin de chaque palier de chargement et déchargement :

$$e_n = e_i - ((1+e_i) / H_i) \cdot \Delta H_n$$

où : ΔH_n est la variation de hauteur de l'éprouvette à la fin de chaque palier de chargement

- L'indice des vides à la fin d'essai

2. Tracer la courbe œdométrique ou la courbe de compressibilité ($e_{(n)} - \lg \sigma_{v(n)}$).

Les courbes de consolidation ($\Delta H - \lg t$) peuvent également être tracées pour chaque palier de chargement.

3. Déterminer graphiquement les paramètres de compressibilité, C_s , C_c , σ_p , comme il est indiqué dans la figure 9.4.

- L'indice de décompression ou de gonflement (C_s) est la pente de la droite DL;
- L'indice de compression (C_c) est la pente de la droite MN;
- La contrainte verticale de préconsolidation (σ_p) est l'abscisse du point C (intersection des droites DL et MN) ;

4. Le module oedométrique sécant (E_{oed}) peut être déterminé, pour tout intervalle de contraintes σ_{va} et σ_{vb} , comme suivant :

$$E_{oed} = (\sigma_{vb} - \sigma_{va}) \cdot H_i / (H_a - H_b) \quad (\sigma_{va} < \sigma_{vb})$$

Où H_a et H_b sont les hauteurs de l'échantillon à la fin de la consolidation sous les contraintes σ_{va} et σ_{vb} respectivement.

9.8. Travail demandé

- 1- Tracer la courbe de compressibilité ($e_{(n)}$ - $\lg \sigma_{v(n)}$) en utilisant les résultats d'un essai de compressibilité qui a été effectué sur un sable lâche.
- 2- Déterminer graphiquement les paramètres de compressibilité.
- 3- Déterminer le module oedométrique sécant (E_{oed}) pour l'intervalle de contraintes $\sigma_{va}=200$ kPa et $\sigma_{vb}=400$ kPa,
- 4- Commenter les résultats

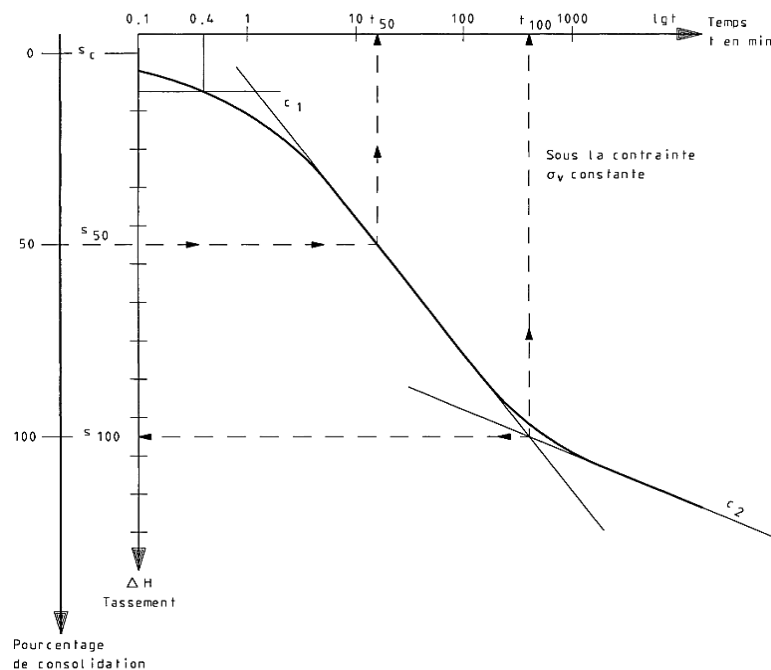


Figure 9.3 : Courbe de consolidation.

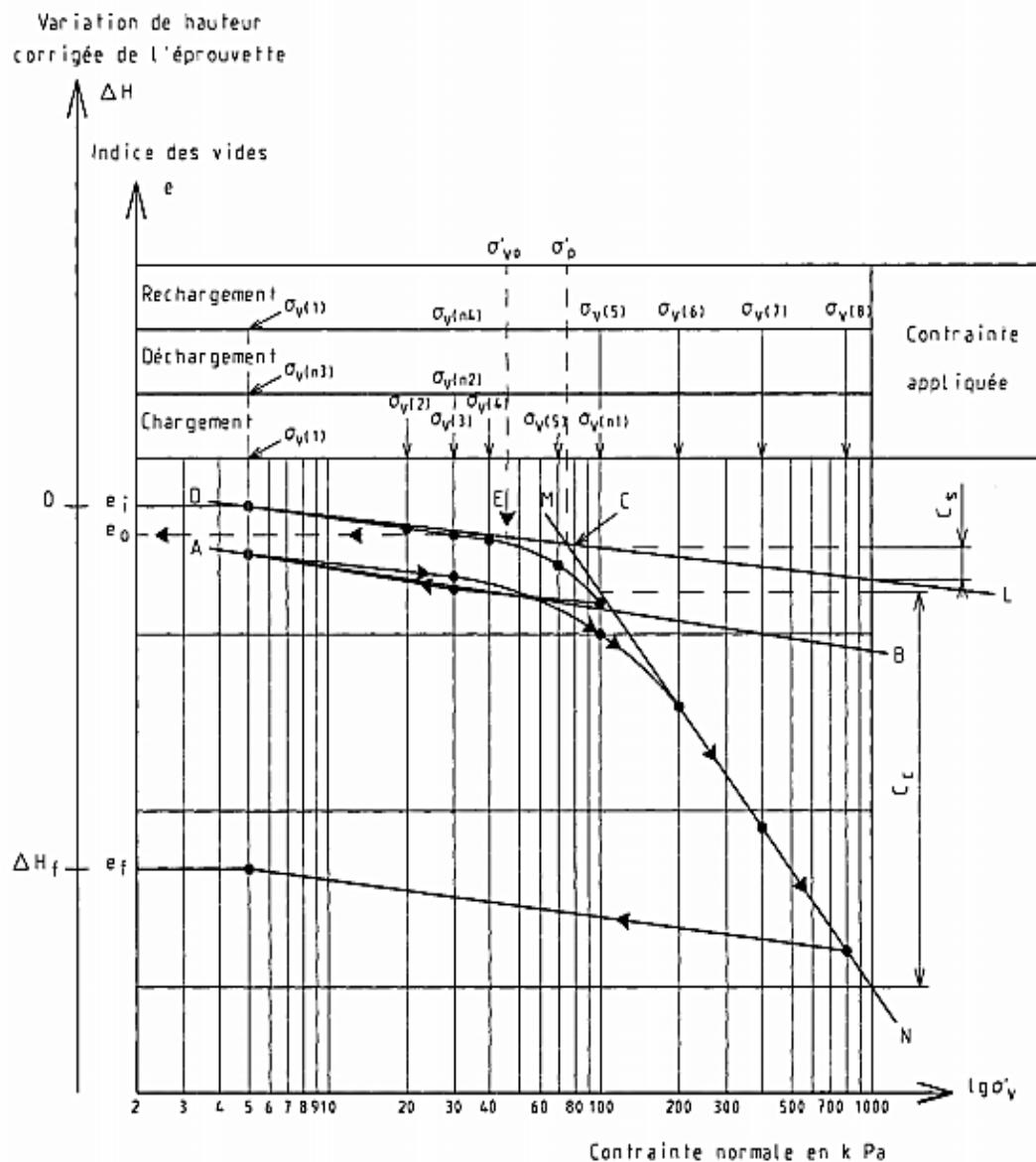


Figure 9.4 : Courbe de compressibilité.

9.9. Feuille d'essai- Essai de compressibilité à l'œdomètre

Date :

Nom & prenom:

Groupe :

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

Tableau 9.1 : Résultats d'un essai de compressibilité à l'œdomètre.

Hauteur initiale, H_i (mm)	19.1	
Densité relative initiale, D_r (%)	20	
Indice des vides maximal, $e_{\max}$ (-)		
Indice des vides minimal, $e_{\min}$ (-)		
Indice des vides initiale, e_i (-)		
Chargement, σ (kPa)	Variation de hauteur, ΔH_n (mm)	Indice des vides, e_n (-)
0		e_i
12.5		
25		
50		
100		
200		
400		
800		
1000		
800		
400		
200		
100		
50		

- L'indice de décompression ou de gonflement, $C_s = \dots$
- L'indice de compression, $C_c = \dots$
- La contrainte verticale de préconsolidation, $\sigma_p = \dots$
- Le module oedométrique sécant, $E_{\text{oed}} = \dots$

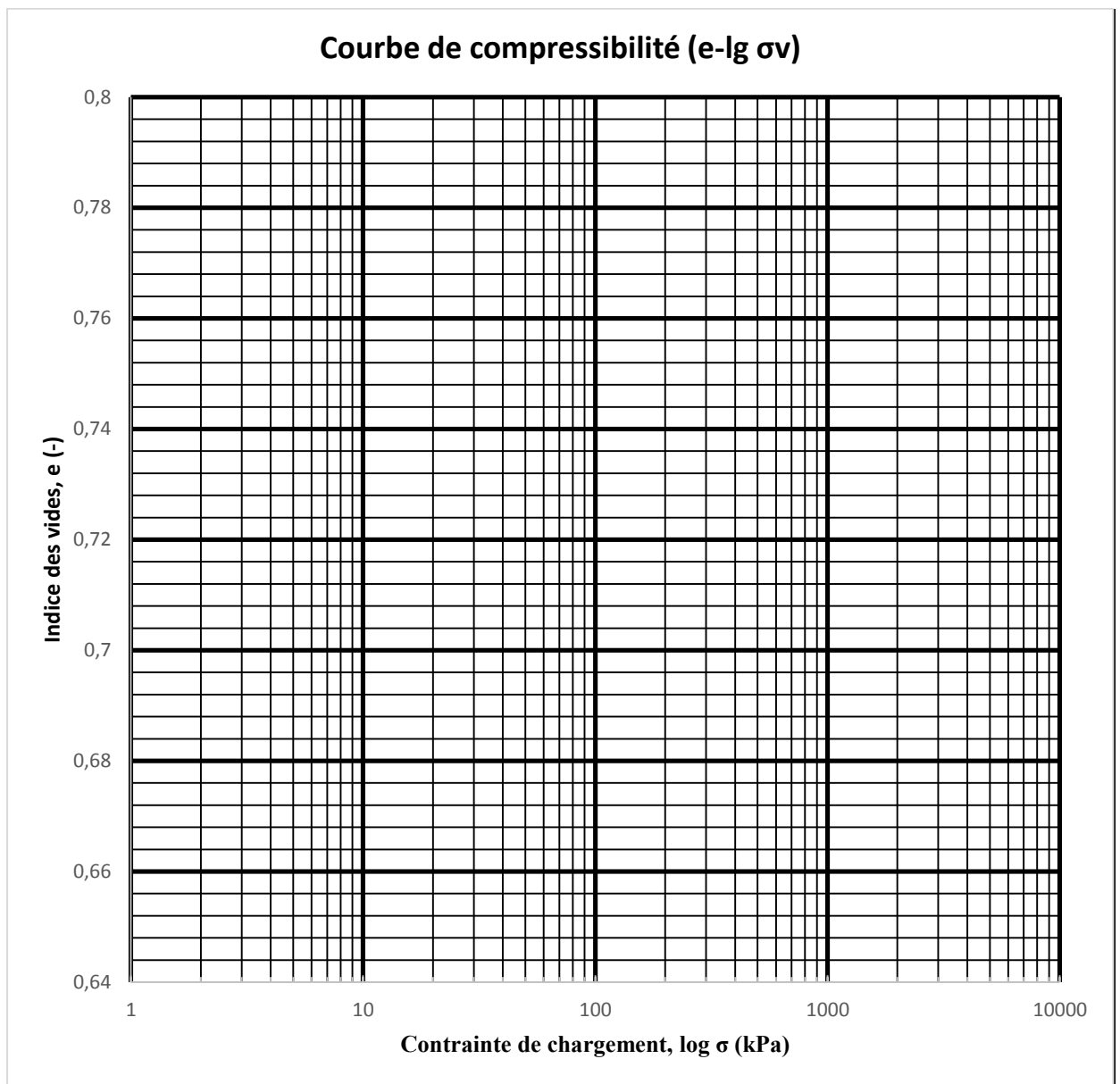


Figure 9.5 : Courbe de compressibilité de l'essai réalisé

9.10. Exemple d'essai- Essai de compressibilité à l'œdomètre

Les résultats obtenus à partir d'un essai de compressibilité à l'œdomètre ont été résumés dans le tableau 9.2.

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

Tableau 9.2 : Exemple de résultats d'un essai de compressibilité à l'œdomètre.

Hauteur initiale, H_i (mm)	19.1	
Densité relative initiale, D_r (%)	20	
Indice des vides maximal, $e_{\max}$ (-)	0.789	
Indice des vides minimal, $e_{\min}$ (-)	0.551	
Indice des vides initiale, e_i (-)	0.741	
Chargement, σ (kPa)	Variation de hauteur, ΔH_n (mm)	Indice des vides, e_n (-)
0	0	0.741
12.5	0.082	0.733
25	0.109	0.731
50	0.163	0.726
100	0.244	0.718
200	0.346	0.709
400	0.505	0.694
800	0.782	0.669
1000	0.929	0.656
800	0.925	0.657
400	0.916	0.657
200	0.884	0.660
100	0.867	0.662
50	0.856	0.6623

➤ Détermination graphiquement les paramètres de compressibilité

D'après la figure 9.6, on peut déterminer les caractéristiques suivantes :

- L'indice de décompression ou de gonflement, $C_s = -\Delta e / \Delta \log(\sigma) = 0.0038$
- L'indice de compression, $C_c = -\Delta e / \Delta \log(\sigma) = 0.103$
- La contrainte verticale de préconsolidation, $\sigma_p = 200$ kPa
- Le module oedométrique sécant, $E_{oed} = (\sigma_{vb} - \sigma_{va}) \cdot H_i / (H_a - H_b)$

$$= (400 - 200) \cdot 19.1 / (18.754 - 18.595)$$

$$= 24025.157 \text{ kPa.}$$

➤ Commentaire de résultats :

D'après les résultats de l'essai obtenus, on peut constater que :

- 1- L'indice de compression ($C_c = 0.103$), donc notre sol est un sol peu compressible, ($0.1 < C_c \leq 0.2$).

- 2- Le module oedométrique sécant, $E_{\text{oed}} = 24.025 \text{ MPa}$, donc ce module confirme que notre sol est un sable ($15 < E_{\text{oed}} \leq 50$).

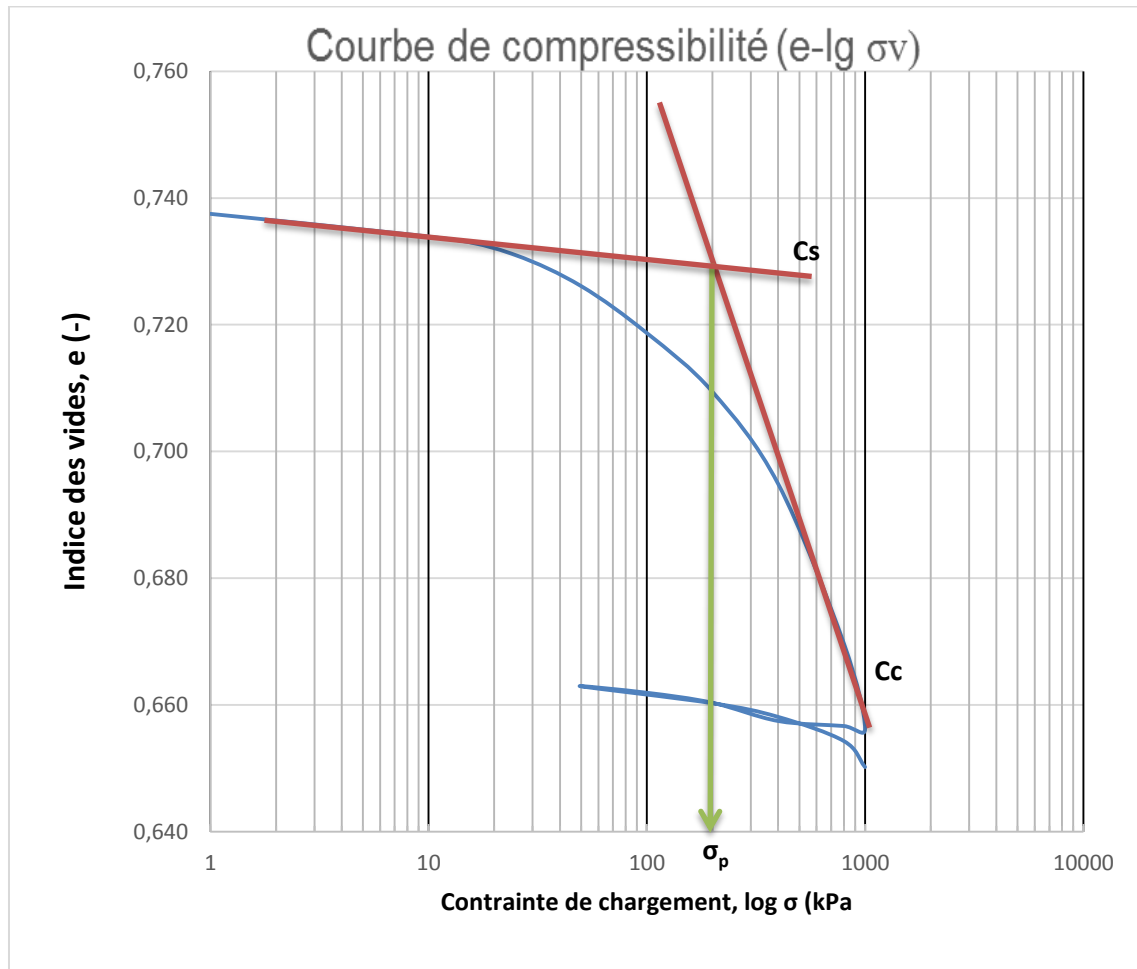


Figure 9.6 : Courbe de compressibilité de l'essai du l'exemple

10. TP 9 : Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande (Selon la norme française NF P94-071-1)

10.1. Objectifs de TP

1. Apprendre les différentes étapes d'un essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande.
2. Effectuer des essais de cisaillement direct sur un matériau à différents contraintes normales, et puis tracer les courbes τ - δl et δh - δl .
3. Dédire les valeurs $\tau_{f,p}$ et $\tau_{f,f}$ qui représentent la contrainte de cisaillement au pic et à l'état final de la courbe ;
4. Dédire les paramètres de résistance au cisaillement des sols, l'angle de frottement ϕ et la cohésion C , à partir du droite intrinsèque (droite de Coulomb).

10.2. Introduction

Pour les sols secs ou saturés, le critère de rupture le plus utilisé est celui de Mohr-Coulomb. Il définit d'une façon très simple une relation linéaire entre les composantes de la contrainte τ et σ s'exerçant sur la facette de rupture au sein du sol :

$$\tau = C + \sigma \tan \phi,$$

C : est appelé la cohésion. Il s'agit de la résistance maximale mobilisée par le matériau pour garder une adhérence entre ses particules. Pour un sable sec et propre, cette résistance est en principe nulle (donc $C=0$). ϕ est l'angle de frottement interne.

L'essai de cisaillement direct à la boîte est considéré comme le plus ancien test pour mesurer la résistance au cisaillement des sols et permet de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un échantillon du sol d'une façon simple. La résistance au cisaillement d'un sol est définie comme étant la contrainte de cisaillement maximale qu'un sol peut supporter.

10.3. Notion sur les différents types d'essais de cisaillement

Le comportement d'un échantillon du sol dépend de la vitesse d'application de la surcharge et de la possibilité de drainage de l'eau interstitielle. Ainsi, on distingue les essais suivants :

a) Essai non consolidé non drainé UU : L'échantillon de sol ne subit aucune consolidation préalable, et au cours de l'essai aucune possibilité de drainage n'est offerte pour l'eau interstitielle. Il s'agit d'un essai rapide qui permet d'obtenir les caractéristiques mécaniques non drainées du sol à savoir ϕ_u et C_u . Pour un sol argileux saturé, l'expérience montre que $\phi_u = 0$.

b) Essai consolidé non drainé CU : L'échantillon est soumis au préalable à une consolidation sous la même contrainte verticale d'essai, soit σ . Ensuite, il est cisailé à une vitesse suffisamment grande pour que l'eau n'ait pas la possibilité immédiate de s'évacuer à l'extérieur du sol. L'essai permet d'obtenir les paramètres C_{cu} et ϕ_{cu} qui ne sont pas des caractéristiques mécaniques proprement dites

c) Essai consolidé drainé CD : L'échantillon est consolidé et soumis par la suite au cisaillement avec une vitesse très lente, de telle façon qu'à chaque instant la surpression interstitielle soit nulle et l'eau s'évacue facilement.

10.4. Principe de l'essai

L'essai consiste à placer l'échantillon dans une boîte, constituée de deux demi-boîtes, et puis le soumettre à une charge verticale N , qui représente la contrainte normale σ_N . A l'aide d'un moteur, une force horizontale de cisaillement (T) est appliquée sur l'une des demi-boîtes, ce qui entraîne un déplacement relatif des demi-boîtes (δl) (figure 10.1). La variation de la hauteur d'échantillon (δh), le déplacement horizontal (δl) et la force de cisaillement (T) doit être enregistré au cours de cisaillement et jusqu'à la fin d'essai.

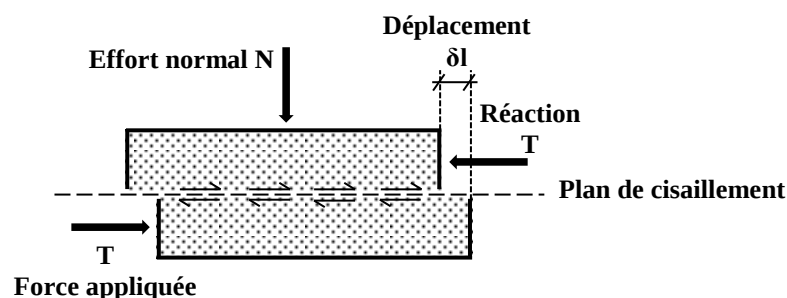


Figure 10.1 : Principe de l'essai de cisaillement

10.5. Dispositif

Ce dispositif de cisaillement contient les éléments de base suivants (figure 10.2):

- Le bâti
- La boîte de cisaillement : elle contient les éléments suivants :
 - Deux demi-boîtes à parois rigides comportent un évidement carré ou circulaire pour l'échantillon (figure 10.3)
 - Deux vis permettant la solidarisation des demi-boîtes (avant l'essai) et deux autres pour appliquer un léger relevage de la demi-boîte supérieure
 - Un chariot étanche mobile support la demi-boîte inférieure
 - Une plaque de maintien (une base rigide)
 - Un piston rigide de chargement
 - Deux plaques drainantes (ou pierres poreuses)
 - Deux grilles perforées et deux grilles solides
- Un système de chargement vertical permettant l'application d'une force normale N sur la partie supérieure du piston.
- Un moteur utilisé pour appliquer une force horizontale de cisaillement T sur l'une des demi-boîtes qui se déplace par rapport à l'autre.
- Un système de mesure, il se compose de trois comparateurs ou capteurs qui servent à mesurer la force horizontale de cisaillement T , le déplacement horizontal δl , et le déplacement vertical du piston δh .



Figure 10.2 : Dispositif de l'essai de cisaillement direct



Figure 10.3: Accessoires de la boîte de cisaillement

10.6. Préparation de l'échantillon

La hauteur des échantillons h doit vérifier la condition suivante : $6d_{\max} \leq h \leq L/2$.

Et le matériau testé a des particules (grains) dont le diamètre maximal $d_{\max}$ est:

- $d_{\max} \leq 5$ mm dans le cas d'une boîte de 60mm de côté
- $d_{\max} \leq 8$ mm dans le cas d'une boîte de 100mm de côté

a. Sols cohérents

Les échantillons des sols non remaniés, ou reconstitués après compactage, sont taillés à l'aide d'une trousse coupante carré ou cylindrique (selon le type de la boîte) dont les dimensions sont compatible avec celles de la boîte de cisaillement. La hauteur h (en mm) de ces éprouvettes doit comprise entre 20 mm et $L/2$.

Pour ce type des sols, il est nécessaire de peser l'échantillon et mesure sa hauteur avant l'essai.

a. Sols pulvérulents

Le matériau est déposé directement dans la boîte de cisaillement. La quantité initiale du sol, à introduire dans la boîte, peut être déterminée en imposant la densité initiale de l'échantillon.

Remarque : Pour les deux types de sol (cohérent ou pulvérulent), le plan de cisaillement doit se trouve à mi-hauteur de l'éprouvette.

10.7. Mode opératoire

Les étapes les plus essentielles à suivre pour effectuer un essai de cisaillement direct à la boîte sont les suivantes :

1. Solidariser les deux demi-boîtes en utilisant deux vis.
2. Placer la plaque de maintien au fond de la boîte de cisaillement.
3. Placer la plaque drainante sur la plaque de maintien suivie par la plaque de grille (grille solide ou perforée).
4. Déposer l'échantillon du sol (voir la section 1.5 pour plus de détail).
5. Mettre en place la boîte contenant l'échantillon dans le chariot fixée sur le bâti si elle a été déplacée.
6. Placer la plaque de grille supérieure (grille solide ou perforée) suivie par la plaque drainante.
7. Placer le piston de chargement.
8. Régler la position des trois capteurs (ou les comparateurs), chacun à sa place, puis les mettre à zéro ou noter leurs valeurs initiales.
9. Remplir le chariot d'eau déminéralisée si l'eau doit être ajoutée au sol.
10. Appliquer une force verticale (N) au sommet du piston en mettant les masses fendues en acier sur le plateau. La masse utilisée (m), requise pour donner la contrainte normale désirée (σ_N), doit être calculée en utilisant la formule suivante :

$$\sigma_N = (g \cdot m)/A$$

Avec : g est l'accélération de la pesanteur, et A est la section de l'échantillon.

11. Mesurer le déplacement vertical du piston (δh) en fonction du temps t pendant au moins une heure et jusqu'à la stabilisation (voir figure 10.4).
12. Retirer les deux vis de solidarisation de la boîte.
13. Annuler le contact entre les deux demi-boîtes en levant la demi-boîte supérieure à l'aide des vis de soulèvement qui doit être ramené à leur position antérieure.
14. Commencer le cisaillement de l'échantillon à une vitesse constante V qui doit être inférieure ou égale à la vitesse maximale V_{max} . Cette dernière (V_{max}) est calculée comme suivant :

$$V_{max} = 125/t_{100} \quad \text{avec} \quad V_{max} \leq 25$$

Où : t_{100} est le temps (en minutes) tiré à partir la courbe de consolidation (voir figure 10.4).

15. Au cours du cisaillement, les lectures des capteurs (ou des comparateurs), du force (T) et du déplacement verticale (δh), sont prises simultanément à chaque augmentation du

déplacement horizontale (δl) d'environ 0.2 mm jusqu'à 2mm, puis tous les 0.5mm jusqu'à la fin d'essai.

16. Stopper le cisaillement: le cisaillement doit être arrêté lorsque la variation de T est inférieure à $1/100.T_{max}$ pour un intervalle de 0.5mm de δl où lorsque le déplacement horizontale (δl) atteint au moins 5mm.
17. Appliquer un déplacement dans le sens inverse au sens de cisaillement à l'aide du moteur jusqu'à que la demi-boîte inférieure retourne à sa position initiale ($\delta l = 0mm$), et puis éteindre le moteur.
18. Enlever l'eau, si elle est ajoutée dans le chariot, en la siphonnant dans un bécher ou en la suçant dans une bouteille en plastique.
19. Enlever la charge verticale.
20. Sortir la boîte de cisaillement, et puis nettoyer le chariot.
21. Enlever l'échantillon, et puis nettoyer toutes les pièces de la boîte de cisaillement.
22. Pour les sols cohérents, peser l'échantillon et déterminer sa teneur en eau après le cisaillement.
23. Pour obtenir un ensemble de trois points sur l'enveloppe de coulomb, effectuer deux essais supplémentaires sur deux autres échantillons identiques, en répétant les étapes de 1 à 22, sous des contraintes normales différentes.

10.8. Traitement des résultats

A la fin d'essai de cisaillement, on aura des valeurs de trois paramètres, l'effort de cisaillement (T), le déplacement vertical (δh) et déplacement horizontale (δl). Pour exprimer les résultats, les étapes suivantes doivent être suivies:

- Calculer la contrainte de cisaillement comme suivant :

$$\tau = T/A$$

Les corrections dues à la variation de la surface de la section cisailée (A) ne sont pas prises en considération.

- Tracer les courbes τ - δl , δh - δl pour les trois contraintes normales (voir figure 10.5).
- Déterminer les valeurs $\tau_{f,p}$ et $\tau_{f,f}$ qui représentent la contrainte de cisaillement au pic et à l'état final de la courbe (voir figure 3.5).
- Représenter sur le même plan σ - τ_f les points $(\sigma, \tau_{f,p})$ et $(\sigma, \tau_{f,f})$.

- Tracer les deux droites (droite de Coulomb) correspondant à chaque état (au pic et à l'état final), et puis déterminer les paramètres de résistance au cisaillement ; l'angle de frottement (ϕ) et la cohésion C (voir figure 10.6).

Où ϕ est la pente des droites et C est égale à la valeur de τ correspondant à $\sigma = 0$.

10.9. Travail demandé

- 1- Effectuer un essai de cisaillement sur un sable dense sous trois contraintes normales différentes 100 kPa, 200 kPa et 300 kPa.
- 2- Tracer les courbes τ - δl , δh - δl et puis la droite de Coulomb
- 3- Déterminer les paramètres de résistance au cisaillement (ϕ et C) pour chaque critère de rupture (au pic et à l'état final)
- 4- Commenter les résultats

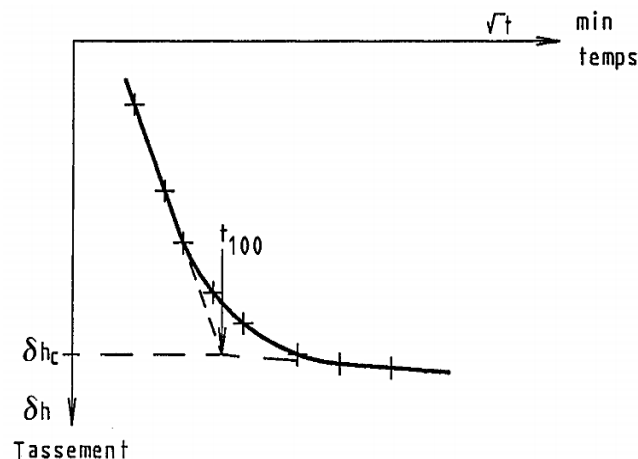


Figure 10.4 : Courbe de Consolidation

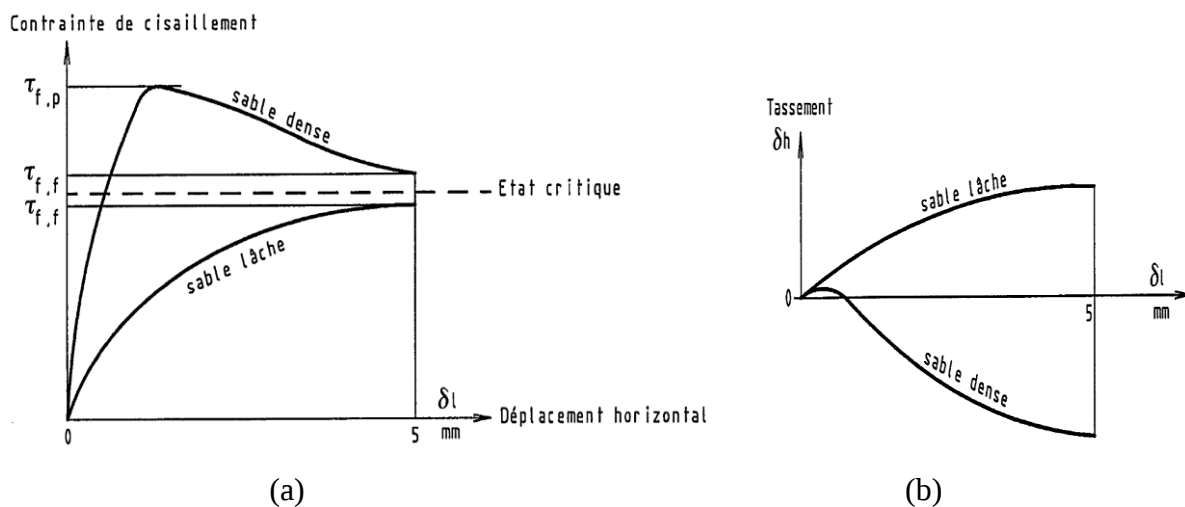


Figure 10.5 : Résultats typiques d'un essai de cisaillement direct sur un sable : (a) τ - δl ; (b) δh - δl .

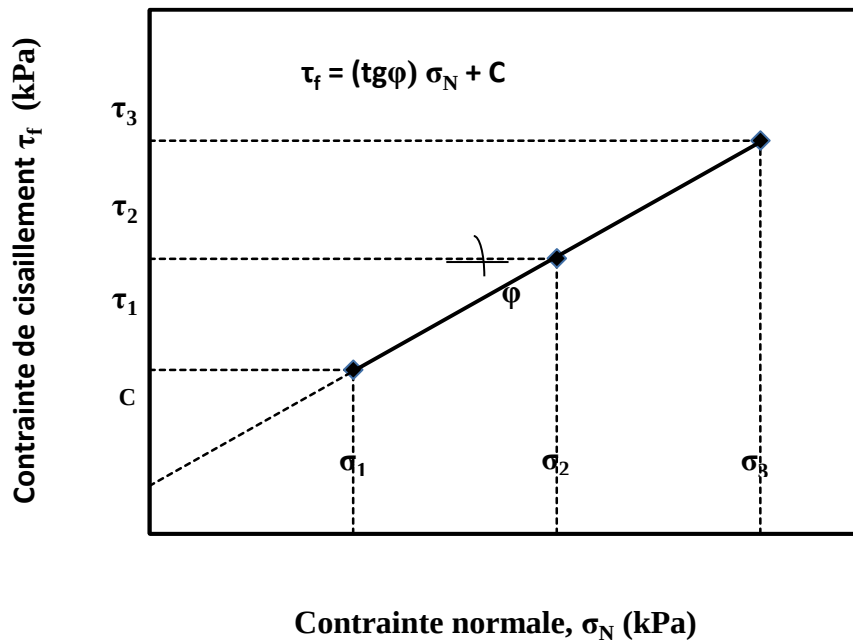


Figure 10.6 : Paramètres de résistance au cisaillement (ϕ et C).

10.10. Feuille d'essai- Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande

Date :

Nom & prenom:

Groupe :

Tableau 10.1 : Résultats d'un essai de cisaillement direct; $\sigma_N=100$ kPa

Déplacement horizontal, δl (mm)	Déplacement verticale, δh (mm)	Force de cisaillement, T (Tableau), (-)	Force de cisaillement, T (Converti), (kN)	Surface corrigée, A (mm ²)	Contrainte de cisaillement, τ (kPa)
0					
0.15					
0.25					
0.5					
0.75					
1					
1.5					
2					
2.5					
3					
3.5					
4					
4.5					
5					
5.5					

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

6					
6.5					
7					
7.5					

Tableau 10.2 : Résultats d'un essai de cisaillement direct; $\sigma_N=200$ kPa

Déplacement horizontal, δl (mm)	Déplacement verticale, δh (mm)	Force de cisaillement, T (Tableau), (-)	Force de cisaillement, T (Converti), (kN)	Surface corrigée, A (mm ²)	Contrainte de cisaillement, τ (kPa)
0					
0.15					
0.25					
0.5					
0.75					
1					
1.5					
2					
2.5					
3					
3.5					
4					
4.5					
5					
5.5					
6					
6.5					
7					
7.5					

Tableau 10.3 : Résultats d'un essai de cisaillement direct; $\sigma_N=300$ kPa

Déplacement horizontal, δl (mm)	Déplacement verticale, δh (mm)	Force de cisaillement, T (Tableau), (-)	Force de cisaillement, T (Converti), (kN)	Surface corrigée, A (mm ²)	Contrainte de cisaillement, τ (kPa)
0					
0.15					
0.25					
0.5					
0.75					
1					
1.5					
2					
2.5					
3					
3.5					
4					

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

4.5					
5					
5.5					
6					
6.5					
7					
7.5					

Tableau 10.4 : Détermination de caractéristiques mécaniques.

Contrainte normale, σ_N (kPa)	Contrainte de cisaillement au pic, τ_{pic} (kPa)	Contrainte de cisaillement à l'état final, τ_{fin} (kPa)
100		
200		
300		

Les caractéristiques mécaniques sont :

- Angle de frottement au pic, $\phi_{pic} = \dots$
- Cohésion au pic, $C_{pic} = \dots$
- Angle de frottement à l'état final, $\phi_{fin} = \dots$
- Cohésion à l'état final, $C_{fin} = \dots$

10.11. Exemple d'essai- Essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande

Pour l'objet de déterminer les caractéristiques mécaniques du sable de Chlef, à cet effet trois essais de cisaillement direct ont été réalisés ($\sigma_N = 100$ kPa, 200 kPa et 300 kPa). Les Tableaux (10.5, 10.6 et 10.7) montrent les résultats des essais obtenus pour cette section.

➤ Données de l'essai :

$e_{max} = 0.789$, $e_{min} = 0.551$, $h = 2.5$ cm, $L = 6$ cm, $V = 90$ cm², $Dr = 85\%$, $m = 150$ gr.

Tableau 10.5 : Exemple de résultats d'un essai de cisaillement direct; $\sigma_N = 100$ kPa

Déplacement horizontal, δl (mm)	Déplacement verticale, δh (mm)	Force de cisaillement, T (Tableau), (-)	Force de cisaillement, T (Converti), (kN)	Surface corrigée, A (mm ²)	Contrainte de cisaillement, τ (kPa)
0	0	0	0	3600	0
0.15	0	70	0.1446	3591	40.27

Cours : Travaux pratiques de mécanique des sols I et II

0.25	0	82	0.1694	3585	47.25
0.5	0	100	0.2066	3570	57.87
0.75	0	134	0.2768	3555	77.86
1	0	154	0.3181	3540	89.86
1.5	0	180	0.3719	3510	105.95
2	-20	190	0.3925	3480	112.79
2.5	-56	182	0.376	3450	108.98
3	-83	165	0.3409	3420	99.68
3.5	-110	155	0.3202	3390	94.45
4	-135	145	0.2995	3360	89.13
4.5	-155	134	0.2768	3330	83.12
5	-162	127	0.2623	3300	79.48
5.5	-162	125	0.2582	3270	78.96
6	-162	125	0.2582	3240	79.69
6.5	-162	125	0.2582	2310	80.43
7	-162	125	0.2582	3180	81.19
7.5	-162	125	0.2582	3150	81.96

Tableau 10.6 : Exemple de résultats d'un essai de cisaillement direct; $\sigma_N=200$ kPa

Déplacement horizontal, δl (mm)	Déplacement verticale, δh (mm)	Force de cisaillement, T (Tableau), (-)	Force de cisaillement, T (Converti), (kN)	Surface corrigée, A (mm ²)	Contrainte de cisaillement, τ (kPa)
0	0	0	0	3600	0
0.15	10	145	0.2995	3591	83.4
0.25	13	182	0.376	3585	104.88
0.5	15	240	0.4958	3570	138.87
0.75	15	275	0.5665	3555	159.35
1	11	305	0.627	3540	177.12
1.5	-8	325	0.6673	3510	190.11
2	-39	334	0.6854	3480	196.95
2.5	-69	336	0.6895	3450	199.85
3	-95	333	0.6834	3420	199.82
3.5	-125	320	0.6572	3390	193.86
4	-145	397	0.6108	3360	181.78
4.5	-147	279	0.5745	3330	172.52
5	-152	267	0.5504	3300	166.79
5.5	-153	256	0.5282	3270	161.52
6	-153	249	0.5141	3240	158.67
6.5	-153	248	0.512	2310	159.5
7	-153	248	0.512	3180	161.01
7.5	-153	248	0.512	3150	162.54

Tableau 10.7 : Exemple de résultats d'un essai de cisaillement direct; $\sigma_N=300$ kPa

Déplacement horizontal, δl (mm)	Déplacement verticale, δh (mm)	Force de cisaillement, T (Tableau), (-)	Force de cisaillement, T (Converti), (kN)	Surface corrigée, A (mm ²)	Contrainte de cisaillement, τ (kPa)
---	--	---	---	--	--

0	0	0	0	3600	0
0.15	3	110	0.2272	3591	63.27
0.25	5	160	0.3305	3585	92.19
0.5	8	257	0.5302	3570	148.51
0.75	10	345	0.7076	3555	199.04
1	112	400	0.8185	3540	231.22
1.5	102	481	0.9818	3510	279.71
2	44	518	1.0564	3480	303.56
2.5	-12	519	1.0584	3450	306.78
3	-62	517	1.0544	3420	308.30
3.5	-84	508	1.0362	3390	305.66
4	-104	495	1.01	3360	300.59
4.5	-112	476	0.9717	3330	291.80
5	-146	468	0.9556	3300	289.57
5.5	-150	457	0.9334	3270	285.44
6	-186	444	0.9072	3240	280
6.5	-186	438	0.8951	2310	278.85
7	-200	426	0.8709	3180	273.86
7.5	-200	413	0.8447	3150	268.16

La figure 10.7 montre l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal considérant les trois contraintes normales.

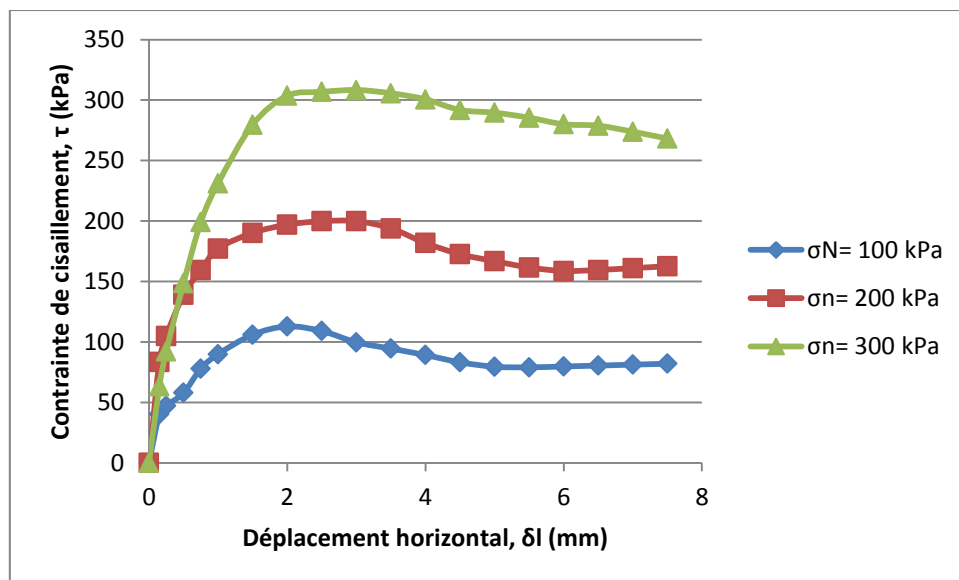


Figure 10.7 : Évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal

Les données de la présente étude (Tableaux 10.5, 10.6 et 10.7) sont reproduites dans le tableau 10.8 et la figure 10.8 en vue de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau utilisé.

Tableau 10.8 : Exemple de détermination de caractéristiques mécaniques.

Contrainte normale, σ_N (kPa)	Contrainte de cisaillement au pic, τ_{pic} (kPa)
100	112.79
200	199.85
300	308.3

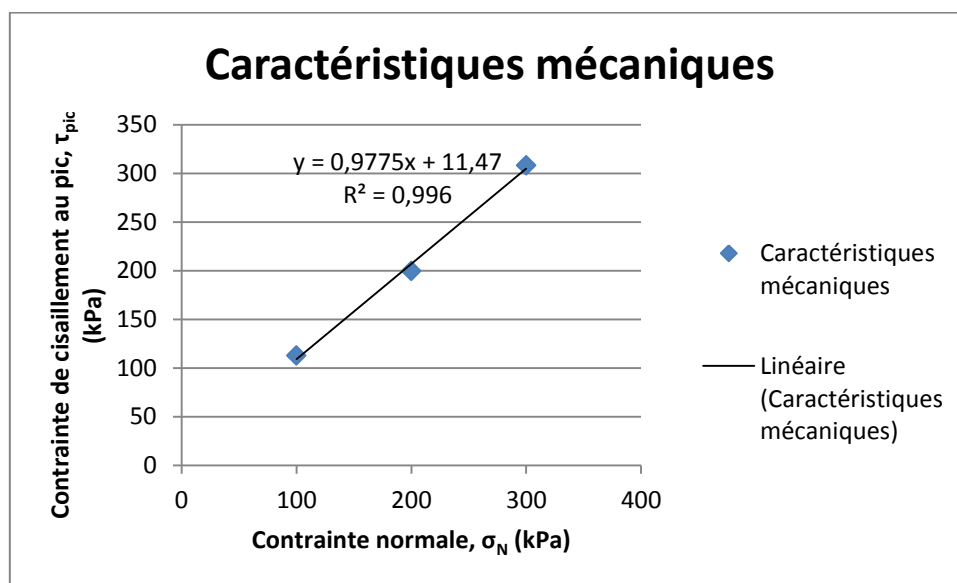


Figure 10.8 : Caractéristiques mécaniques (ϕ et C).

➤ **Les caractéristiques mécaniques sont :**

- Angle de frottement au pic, $\phi_{pic} = \tan^{-1}(0.9775) = 44.35^\circ$
- Cohésion au pic, $C_{pic} = 11.47$ kPa

➤ **Commentaire de résultats :**

D'après les résultats de l'essai obtenus, on peut constater que :

- 1- Les résultats de cisaillement direct obtenus présentent un comportement dilatant pour les trois contraintes normales ($\sigma_n = 100$ kPa, 200 kPa et 300 kPa), ce comportement confirme la densité relative initiale choisie ($Dr = 85\%$, dense).
- 2- Les résultats de l'essai obtenus donnent une petite cohésion $C_{pic} = 11.47$ kPa, donc notre sable utilisé contient une fraction des fines.

11. Références Bibliographiques

Bouafia, A and Mir, M. (2012) : "Introduction à la Mécanique des sols" 'Cours biens illustrés, Applications'

Caquot et Kerisel, (1966) : "Traité de mécanique des sols", Gauthier, Villars – Paris.

Collas J et Havard M (1982) "Guide de géotechnique-Lexique et essais", édition Eyrolles, 136 pages.

Collas.J et Havard. M. (1983) : "Guide de géotechnique: Lexique et Essais", Editions Eyrolles.

Costet et Sanglerat, (1983) : "Cours pratiques de mécanique des sols",Dunod – Paris.

Delleur J. W. (1999): "The Handbook of Groundwater Engineering". CRC Press/SpringerVerlag, Boca Raton, FL.

Head K. H. and Epps R. J. (2011): "Manual of Soil Laboratory Testing", Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests, Third Edition, Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, UK, 499 p.

Michael E. Kalinski, (2011): "Soil mechanics lab manual" (2nd Edition). University of Kentucky.

NF P 94-011 (1999) : Sols : reconnaissance et essais, Description - Identification - Dénomination des sols Terminologie - Éléments de classification.

NF P 94 -050 (1995) : Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Méthode par étuvage.

NF P94-051 (1993) : Essai de limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle-Limite de plasticité au rouleau.

NF P 94 -054 (1991) : Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols. Méthode du pycnomètre à eau.

NF P 94 -056 (1996) : Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage.

NF P 94 -057 (1992) : Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation.

NF P 94 -059 (2000) : Détermination des masses volumiques minimale et maximale des sols non cohérents.

NF P 94 -061-2 (1996) : Détermination de masse volumique d'un matériau en place. Méthode au densimètre à membrane.

NF P 94 -078 (1997) : Indice CBR après immersion-Indice CBR immédiat-Indice portant immédiat (IPI). Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

NF P 94-090-1 (1997) "Essai œdométrique -Partie 1 : Essai de compressibilité sur matériaux fins quasi-saturés avec chargement par paliers".

NF P 94 -093 (1999) : Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.

NF P94-071-1 (1994) : "Essai de cisaillement rectiligne à la boîte- Partie 1 : Cisaillement direct".

.