

Université Aboubekr Belkaïd de TLEMCEM

Faculté de Technologie

Département de Génie-Civil

POLYCOPIE POUR L2 GENIE CIVIL

TRAVAUX PRATIQUES DE MECANIQUE DES SOLS 1

Code Module : GS 441

Zakia KHELIFI & Mohammed Amine ALLAL

Expertisé par

Pr BENCHOUK Assia

Dr DERFOUF Mounir

Année universitaire 2020/2021

AVANT-PROPOS

Il y a de cela quelques années, au début de ma carrière, parmi les nombreux objectifs que je m'étais fixés, la réalisation d'un document pédagogique support pour les travaux pratiques de mécanique des sols trônait dans ma tête, en bonne place. Chemin faisant, j'ai régulièrement reporté ce projet aux calendes grecques, jusqu'à penser qu'il resterait, au mieux, un vœu pieux, et au pire, un rêve oublié.

Le temps a passé, et aujourd'hui, porté par la volonté, les efforts, le sérieux et l'ambition de Mlle Khelifi, ce projet est en passe d'aboutir, au grand bénéfice de nos étudiants, et je m'en réjouis.

Je m'en réjouis, parce que la mécanique des sols supporte toute l'ingénierie géotechnique, et cela passe forcément par l'observation, la description, la mesure et le calcul ; et qui dit mesure pense bien sûr à l'investigation géotechnique (au laboratoire et in-situ). Quant aux calculs, qui sont alimentés par la mesure, ils ne se rapprocheront du réel que grâce à des mesures qualitativement et quantitativement acceptables ; ce qui optimisera le dimensionnement et améliorera la durabilité des ouvrages.

Cela dit, bien que la géotechnique se soit imposée parmi les géosciences et la construction, elle a peu évolué chez nous et est restée le parent pauvre (dans tous les sens du terme, particulièrement sur le financement des investigations) des projets de construction. Mais portés par notre passion de ce mélange science-art-technique, nous osons croire que les choses ne pourront que s'améliorer.

Ainsi, ce modeste document se veut un support pédagogique, mais a aussi, comme humble prétention, de jouer un rôle sensibilisateur par le fait qu'il apporte des éclaircissements par rapport aux normes, et qu'il essaye de faciliter le travail et les interprétations par les exemples qu'il propose. Il faut dire qu'un essai sur un échantillon ne concerne strictement qu'une fraction d'un matériau, de formation géologique, par essence hétérogène et anisotrope. C'est pour cela que la mesure reste une nécessité qui doit répondre aux exigences en vue d'en assurer sa fiabilité, sa précision et sa fidélité ; et cela n'est possible qu'avec le respect des exigences de la norme ISO 17025, qui concerne les laboratoires d'essais et d'étalonnages. Mais là est déjà une toute autre histoire...

En ce qui nous concerne, nous espérons que ce photocopié pourra participer à améliorer la qualité de la formation, et pourquoi pas, susciter des vocations. Parce que, comme disait Montaigne, « l'étudiant n'est pas un vase à remplir, mais un feu à attiser ».

Prof. ALLAL M. Amine

Biographie des auteurs



Allal Mohammed Amine est enseignant-chercheur à l'Université de Tlemcen (Algérie), où il exerce en tant que professeur, spécialisé dans les compétences transversales pour les formations techniques. Un parcours très éclectique et une curiosité toujours vivace lui ont permis d'acquérir et de s'approprier des compétences multiples et diverses, techniques, managériales et socio-culturelles. Il est évaluateur de projets européens avec Erasmus+ France, depuis le 12.12.2016 pour la période allant jusqu'à 2027, pour les projets de partenariat stratégiques et de mobilité internationale de crédits de l'enseignement supérieur. Il est actuellement membre de la task force chargée de la poursuite de la mise en œuvre des normes et lignes directrices africaines pour l'assurance qualité dans les EES (ASG/QA Task Force ; projet HAQAA2 ; UA/DAAD/OBREAL). Depuis juillet 2016, il est membre de la CIAQES (Commission d'Implémentation de l'Assurance Qualité dans l'Enseignement Supérieur), chargée de conceptualiser, développer, mettre en œuvre et suivre l'assurance qualité dans les EES algériens. Il a été membre du groupe des HERES (Higher Education Reform Experts) dans le cadre du programme Erasmus+ de janvier 2016 à décembre 2018. Il exerce en tant qu'expert évaluateur des Universités Africaines suivant le Mécanisme Africain de la Qualité (AQRM/UA), depuis Septembre 2014. Il a été Responsable Assurance Qualité de l'Université de Tlemcen, de mars 2013 à juillet 2018. Il est aussi évaluateur principal auprès d'ALGERAC pour la norme ISO 17025 (de novembre 2012 à ce jour). Passionné de pédagogie, de communication et de management de la qualité, il a mis en place un master en management de la construction et participe à l'accompagnement et la formation des nouveaux enseignants à la pédagogie et didactique. Il a participé activement à l'étude de restauration de 2 sites historiques (Mansourah et Honaïne) et d'un monument historique (mosquée de Sidi-Senouci). De janvier 2013 à janvier 2016, il a été membre du Conseil Scientifique de l'Agence Thématique de la Recherche Scientifique et Technologique (ATRST ex. ANDRU). Il a dirigé un projet national de recherche PNR [n°16/u13/4063 ; agréé à partir de Mai 2011 pour une durée de 2 années] et 05 projets de recherche PRFU [ex. CNEPRU], principalement autour du management des risques dans la construction. Il a aussi été membre de 5 projets de recherche CNEPRU, sur des thématiques centrées sur la valorisation des matériaux locaux. Il a produit 170 communications et publications, dont 21 publications internationales, 8 publications nationales et 54 communications internationales (présentées hors Algérie) ; 16 articles dans des quotidiens nationaux ; 10 ouvrages scientifiques édités [Management et Technique]. Ses axes de recherche étaient centrés sur la valorisation des matériaux locaux, les risques naturels, puis sur le management des risques, le management de projet, et la qualité dans la construction. Il est titulaire d'un diplôme de Docteur-Ingénieur de l'Ecole Centrale de Paris, d'un DEA de l'université de Paris VI (France) et d'un Certificat en Management de l'Université de Missouri-Rolla (USA). Il a exercé diverses responsabilités administratives à l'université de Tlemcen (Algérie), particulièrement directeur de l'INES de génie-civil de 1991 à 1992, et vice-doyen chargé des études de graduation de la faculté de technologie de 1999 à 2002.



Docteur Khelifi Zakia est enseignante-chercheuse au sein de la faculté de Technologie, Université de Tlemcen (Algérie), où elle exerce depuis Novembre 2017. Après l'obtention d'un diplôme d'ingénieur en Génie-Civil, elle est titulaire d'un Magister de l'Université de Béchar, puis d'un diplôme de Doctorat en sciences de l'Université de Tlemcen. Boursière du programme Algéro-Français pour les doctorants PROFAS B+ (2014), elle a finalisé sa thèse à l'université du Havre (France). Pendant la préparation de sa thèse, elle a effectué plusieurs stages dans les laboratoires de recherche en France (LOMC, Université du Havre), et en Belgique (Département de textiles, Université de Gent). Elle est passionnée par l'apprentissage et le partage de connaissances ; elle a bénéficié d'une très bonne formation en pédagogie. Dans le domaine de recherche, elle est intéressée par les nouveaux challenges concernant le développement des méthodes innovantes aux problèmes écologiques de l'environnement Algérien tel que l'utilisation des matériaux locaux pour la fabrication des matériaux écologiques. Elle a produit des publications et des communications dans les domaines des éco-matériaux, biodégradation des fibres végétales, stabilité des sols et glissements de terrain. Elle est membre d'un projet de

recherche PRFU centré sur la contribution au développement de nouvelles approches pour le management des risques dans la construction.

Table des matières

AVANT-PROPOS	I
Biographie des auteurs	II
Tables des matières	IV
Notations et acronymes	VII
Introduction	1
Chapitre I. Mesure des caractéristiques pondérales	
1. Mesure de la masse volumique des particules solides des sols par la méthode du pycnomètre	3
1.1 Introduction	3
1.2 Principe de l'essai	3
1.3 Equipements et matériaux	3
1.4 Procédure de l'essai	4
1.5 Expression des résultats	5
1.6 Exemple de calcul.....	6
2. Mesure de la masse volumique des sols par pesée hydrostatique	6
2.1 Introduction.....	6
2.2 Principe de l'essai	6
2.3 Equipements et matériaux	6
2.4 Procédure de l'essai	7
2.5 Expression des résultats.....	7
3. Mesure de la teneur en eau des sols par étuvage	7
3.1 Introduction.....	8
3.2 Principe de la mesure de la teneur en eau.....	9
3.3 Equipements et matériaux	9
3.4 Procédure de l'essai	9
3.5 Expression des résultats.....	10
3.6 Exemple de calcul	10
Conclusion	11
Chapitre II. Mesure des paramètres de consistance, et de la surface spécifique des sols fins	
1. Mesure des paramètres de consistance (limite de liquidité et de plasticité)	12
1.1 Introduction.....	12
1.2 Principe de l'essai	12
1.3 Equipements et matériaux.....	13

1.4 Détermination de la limite de liquidité	13
1.5 Détermination de la limite de plasticité	17
1.6 Exemple de calcul	20
2. Mesure de la sensibilité à l'eau ; essai au bleu de méthylène	21
2.1 Introduction	21
2.2 Principe de l'essai	22
2.1 Equipements et matériaux	22
2.2 Procédure de l'essai	23
2.5 Expression des résultats	24
2.6 Exemple de calcul	25
2.7 Conclusion	26

Chapitre III. Analyse Granulométrique

1. Introduction	27
2. Principe des essais et modes opératoires	27
2.1 Analyse Granulométrique par Tamisage à Sec (norme NF P 94-056 : 1996)	27
2.2 Analyse Granulométrique par Sédimentation (norme NF P 94-057 : 1996)	27
2.3 Equipements et matériels	28
2.4 Procédure des essais	28
2.5 Expression des résultats	30
2.6 Classification du sol	33
3. Exemple de calcul	35
3.1 Analyse granulométrique par tamisage à sec	35
3.2 Analyse granulométrique par sédimentation	36
3.3 Classification du sol	39
4. Conclusion	39

Chapitre IV. Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)

1. Introduction	40
2. Principe de l'essai	40
3. Equipements et matériaux	40
4. Procédure de l'essai	41
5. Expression des résultats	42
6. Exemple de calcul	44
7. Conclusion	46

Chapitre V. Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane

1. Introduction	47
2. Principe de l'essai	47
3. Equipements et matériaux	47
4. Procédure de l'essai	48

5. Expression des résultats	49
6. Exemple de calcul	49
7. Conclusion	50
Conclusion	51
Bibliographie	54
Annexes	56

Notations et acronymes

Notations

ρ_s : masse volumique des particules solides.

ρ_w : masse volumique de l'eau.

ρ_h ou ρ : masse volumique humide.

ρ_d : masse volumique du sol sec.

ρ_p : masse volumique de la paraffine.

B : masse de bleu de méthylène.

C_c : coefficient de courbure

C_u : coefficient d'uniformité

D : diamètre des particules du sol.

G_s : densité des grains solides.

G_d : densité sèche.

G_h : densité humide.

I_p : indice de plasticité.

m : masse.

m_h : masse humide.

m_s : masse des grains solides.

m_w : masse d'eau.

N : nombre de chocs.

S_{ST} : surface spécifique totale.

V : volume total.

V_s : volume des grains solides.

V_w : volume d'eau.

VBS : valeur de bleu de méthylène.

w : teneur en eau.

w_L : limite de liquidité.

w_P : limite plasticité.

w_s : limite de retrait.

Acronymes

DIS : Draft for International Standard (projet de norme internationale).

LPC : Laboratoire des Ponts et Chaussée.

NF P : Norme Française Bâtiment, génie civil.

ISO: International Organization for Standardization (Organisation Internationale de Normalisation).

USCS : Unified Soil Classification System.

Introduction

Les essais en laboratoire appropriés des sols pour déterminer leurs propriétés physiques font partie intégrante de tout ce qui concerne la géotechnique, comme la conception et la construction des fondations, de la mise en place et de l'amélioration des sols, la spécification et le contrôle de la qualité des travaux de compactage du sol, ainsi que tout ce qui concerne les mouvements de terrain.

Il faut garder à l'esprit que les dépôts naturels du sol présentent souvent un degré élevé de non-homogénéité, ce qui est source de beaucoup de pathologies. Les propriétés physiques d'un dépôt de sol peuvent changer dans une large mesure, même à quelques centaines de mètres près. Les équations théoriques et empiriques fondamentales qui sont développées en mécanique des sols peuvent être correctement utilisées dans la pratique si, et seulement si, les paramètres physiques utilisés dans ces équations sont correctement évalués en laboratoire. Ainsi, apprendre à réaliser des tests de sol en laboratoire joue un rôle très important dans la profession d'ingénieur géotechnicien.

Les principaux objectifs des travaux pratiques dans des enseignements de mécanique des sols sont d'introduire les techniques de mesure aux étudiants de deuxième cycle en Génie Civil, et de familiariser les étudiants avec les méthodes d'essai géotechniques, les normes d'essai et la terminologie communes. Les procédures de tous les essais décrits dans ce manuel de travaux pratiques sont rédigées conformément aux normes applicables (ISO et AFNOR). Il est important de bien connaître ces normes pour comprendre, interpréter et appliquer correctement les résultats de laboratoire obtenus à l'aide d'une méthode normalisée. Chaque essai décrit dans le présent manuel est associé à un numéro de norme AFNOR, comme il est mentionné dans la bibliographie.

Ce manuel est structuré conformément au programme officiel de deuxième année licence Génie Civil. Il est composé de cinq chapitres qui détaillent les procédures d'essais. A la fin de chaque chapitre, des exemples de la méthode du calcul et la procédure du tracé des graphiques sont aussi présentés.

Le premier chapitre est dédié à la détermination des caractéristiques pondérales des sols telles que : la masse volumique des grains solides, la masse volumique apparente et la teneur en eau.

Le deuxième chapitre est consacré à la détermination des paramètres de consistance qui sont la limite de liquidité et la limite de plasticité, ainsi que la mesure de l'activité des sols fins à l'aide de l'essai de bleu de méthylène.

L'analyse granulométrique par les deux méthodes de tamisage et sédimentométrie a été l'objet du troisième chapitre.

Le quatrième chapitre est destiné à la mesure des caractéristiques de compactage des sols à travers la réalisation de l'essai Proctor normal et modifié.

Le but du dernier chapitre est de mesurer la densité in situ des sols en utilisant la méthode de densitomètre à membrane.

A la fin, ce travail pédagogique s'achève par une conclusion qui met en valeur l'importance de l'utilisation des essais normalisés dans le but de déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques

des sols, ainsi que l'importance du calcul d'incertitudes de mesure et de la nécessité de l'étalonnage des appareils de mesure (conformément à la norme ISO 17025 : 2018)

Chapitre I. Mesure des caractéristiques pondérales

1. Mesure de la masse volumique des particules solides des sols par la méthode du pycnomètre

1.1 Introduction

La masse volumique des particules solides du sol (ρ_s) est définie comme le rapport entre la masse de ces particules solides (m_s) et leur volume (V_s). En mécanique des sols, la masse volumique des particules solides est un paramètre important pour le calcul de la relation poids-volume, pour connaître l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité. Elle est définie comme suit :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (1.1)$$

L'objectif de l'essai est de déterminer, au pycnomètre à eau, la masse volumique des particules solides du sol.

1.2 Principe de l'essai

La masse des particules solides est obtenues par pesage. Le volume est mesuré au moyen d'un récipient à volume calibré, appelé pycnomètre. La masse volumique des solides est ainsi déterminée directement au pycnomètre, qui contient un volume prédéterminé de liquide, en étant rempli jusqu'à la marque supérieure du pycnomètre.

1.3 Equipements et matériaux

Les équipements et matériaux suivants sont nécessaires pour la mesure de la densité des grains solides du sol (fig.1.1) :

- Un sol sec (séché dans l'étuve à 105 °C).
- Deux pycnomètres munis de bouchons rodés à tube capillaires.
- Une plaque chauffante.
- Une balance.
- Un entonnoir.
- Eau distillée.

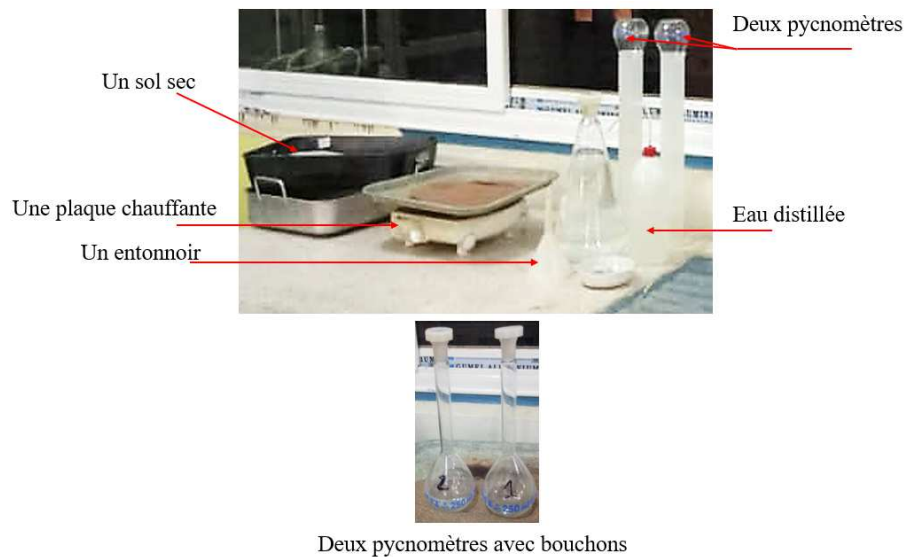


Figure 1.1 Appareillage de l'essai de pycnomètre.

1.4 Procédure de l'essai

La procédure expérimentale présentée ici est conforme à la norme **NF P 94-054 (1991)** [1], qui consiste à utiliser un échantillon du sol séché à l'étuve. Le calcul de la masse volumique des solides est basé sur deux mesures après que le sol utilisé soit tamisé au tamis de 2 mm. Les étapes de l'essai sont les suivantes (fig.1.2) :

1. Peser le pycnomètre vide et son bouchon (m_1), après s'être assuré qu'ils étaient propres et secs.
2. Prendre $m = 25$ g du sol sec.
3. Introduire la prise du sol dans le pycnomètre et peser avec son bouchon (m_2).
4. Remplir le ballon du pycnomètre avec de l'eau distillée et placer le tout sur la plaque chauffante. Le but de chauffage est d'enlever l'air du mélange sol-eau. L'ébullition du pycnomètre contenant le mélange sol-eau doit se faire doucement pendant environ 15 à 20 minutes. En accompagnant l'ébullition d'une agitation continue du ballon. (Si la chaleur est trop forte, le sol peut déborder).
5. Arrêter le chauffage quand l'eau contenue dans le pycnomètre est portée à ébullition.
6. Laisser le pycnomètre refroidir sur la pailleasse.
7. Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au repère. Le pycnomètre est séché puis pesé (m_3).
8. Vider et nettoyer le pycnomètre, le remplir avec de l'eau distillée jusqu'au repère. L'ensemble est pesé (m_4).

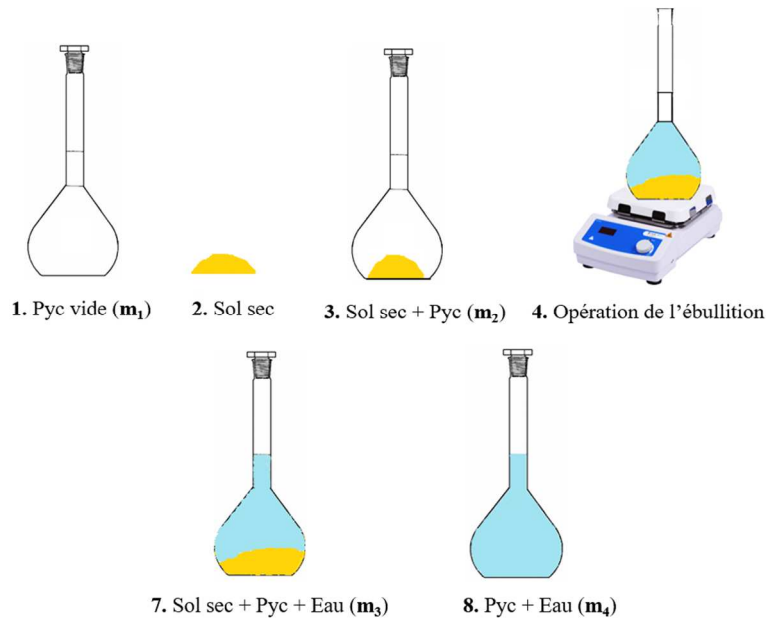


Figure 1.2 Principales étapes de l'essai au Pycnomètre

1.5 Expression des résultats

La masse volumique des particules solides (ρ_s) est la moyenne arithmétique de deux mesures réalisées sur le même échantillon du sol. Elle est déterminée à partir de la formule suivante :

$$\rho_s(\text{kg/m}^3) = \frac{(m_2 - m_1)}{(m_4 + m_2 - m_1 - m_3)} \times \rho_w \quad (1.2)$$

Avec :

- m_1 : masse du pycnomètre vide.
- m_2 : masse de pycnomètre plus la masse du sol sec.
- m_3 : masse du pycnomètre, du sol et de l'eau.
- m_4 : masse du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au repère.
- ρ_w : masse volumique de l'eau (kg/m^3).

Alors que la densité des grains solides (G_s) est calculée à partir de la formule suivante :

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (1.3)$$

Le tableau 1.1 donne des valeurs moyennes de la densité des grains solides pour certains sols.

Tableau 1.1 Différentes valeurs la densité des grains solides pour certains sols [2]

Type de sol	Densité des grains solides
Sable	2,63 – 2,67
Limons	2,65 – 2,7
Argile et argile limoneuse	2,67 – 2,9
Sols organiques	moins de 2

1.6 Exemple de calcul

Le tableau 1.2 donne des mesures effectuées au laboratoire pour déterminer la masse volumique des particules solides d'un échantillon du sol sec. La prise du sol sec est égale à **25 g** pour chacun des deux essais. La masse volumique de l'eau est conventionnellement prise égale à **1000 kg/m³**.

Afin de calculer la masse volumique des particules solides (ρ_s), on utilise la formule (1.2) pour les deux essais. La masse volumique des particules solides du sol sera la moyenne arithmétique des deux valeurs trouvées.

Tableau 1.2 Calcul de la masse volumique des grains solides du sol

	Essai N° 1	Essai N° 2
Masse de pycnomètre vide (m_1) [g]	166	163,31
Masse de pycnomètre avec la masse du sol sec (m_2) [g]	191	188,31
Masse du pycnomètre, du sol et de l'eau (m_3) [g]	675,5	674,66
Masse du pycnomètre rempli d'eau jusqu'au repère (m_4) [g]	660	659,17
La masse volumique des particules solides (ρ_s) [kg/m ³]	2631	2628
La moyenne arithmétique des deux valeurs (ρ_s) [kg/m ³]	2630	
La densité des grains solides du sol (Gs)	2,63	

2. Mesure de la masse volumique des sols par pesée hydrostatique

2.1 Introduction

La masse volumique des sols est définie comme le rapport entre la masse d'un sol (m) et son volume (V) qu'il occupe (y compris les vides). Elle est définie par la formule suivante :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.4)$$

Où la masse volumique des sols (ρ) est en kg/m³.

2.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer les deux paramètres caractérisant un même échantillon du sol qui sont, successivement, la masse et le volume. La masse est obtenue par pesage et le volume est mesuré en utilisant la méthode par pesée hydrostatique après avoir paraffiné l'échantillon du sol. Ce principe d'essai est conformément à la norme **NF P 94-053 (1991)** [3].

2.3 Equipements et matériaux

Les équipements et les matériaux nécessaires pour mesurer le volume de l'échantillon du sol par la méthode des pesées hydrostatiques sont les suivants :

- Un échantillon du sol bien taillé et de forme simple.
- Un bac de paraffine avec son système de chauffage.
- Un fil à découper.

- Un récipient rempli d'eau pour immerger le panier suspendu à l'étrier de la balance.

2.4 Procédure de l'essai

Le volume de l'échantillon du sol est mesuré selon les étapes suivantes (fig. 1.3) :

1. Peser l'échantillon du sol (m).
2. Paraffiner l'échantillon
3. Peser l'échantillon paraffiné (m_p).
4. Placer l'échantillon dans le panier suspendu à l'étrier de la balance et est immergée afin d'être pesée (m'_p) avec la balance hydrostatique.

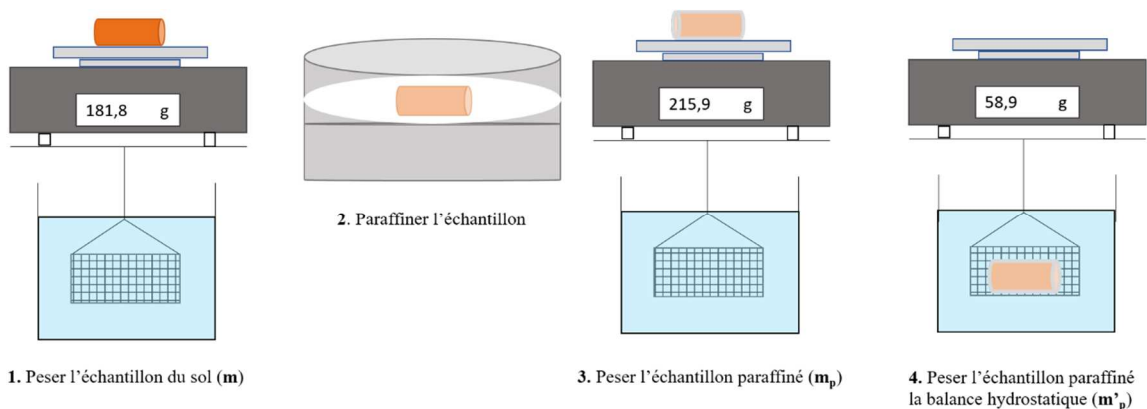


Figure 1.3 Principales étapes de la méthode pesée hydrostatique.

2.5 Expression des résultats

Les trois pesées effectuées pendant l'expérimentation permettent de déterminer la masse volumique par les relations ci-dessous :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.5)$$

Avec :

$$V = \frac{(m_p - m'_p)}{\rho_w} - \frac{(m_p - m)}{\rho_p} \quad (1.6)$$

Où :

ρ_w : masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3).

ρ_p : masse volumique de la paraffine (880 kg/m^3).

2.6 Exemple de calcul

Afin de mesurer la masse volumique d'un échantillon du sol au laboratoire, l'ingénieur a utilisé la méthode par pesée hydrostatique dont les résultats trouvés pendant l'essai sont donnés dans le tableau 1.3. On prendra $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_p = 880 \text{ kg/m}^3$.

Tableau 1.3. Résultats trouvés par la méthode de la pesée hydrostatique.

La mesure	La valeur
La masse réelle de l'échantillon du sol	181,8 g
La masse de l'échantillon après de le paraffiner avec une couche de la cire	215,9 g
La masse de l'échantillon paraffiné après immersion dans l'eau (pesée hydrostatique)	58,9 g

La masse volumique de cet échantillon d'essai peut se calculer en utilisant les deux formules (1.5) et (1.6).

La masse de l'échantillon est égale à $m = 181,8$ g. Son volume est calculé par la formule (1.6) :

$$V = \frac{(m_p - m'_p)}{\rho_w} - \frac{(m_p - m)}{\rho_p} \quad (1.6)$$

Où :

$m_p = 215,9$ g et $m'_p = 58,9$ g. En remplaçant par ces valeurs dans l'équation (1.6), on trouve :

$$V = \frac{(215,9 - 58,9) \times 10^{-3}}{1000} - \frac{(215,9 - 181,8) \times 10^{-3}}{880}$$

$$V = 1,1825 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Donc :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{181,8 \times 10^{-3}}{1,1825 \times 10^{-4}}$$

$$\rho = 1537,42 \text{ kg/m}^3$$

Ainsi, la masse volumique de l'échantillon du sol mesurée par la méthode hydrostatique est

$$\rho = 1537,42 \text{ kg/m}^3.$$

3. Mesure de la teneur en eau des sols par étuvage

3.1 Introduction

La mesure de la teneur en eau est principalement utilisée pour effectuer des calculs poids-volume dans les sols. La teneur en eau est également une mesure des caractéristiques de retrait-gonflement et de résistance des sols cohésifs, comme le montrent les essais de limite de liquidité et la limite de plasticité.

La teneur en eau d'un matériau est définie par le rapport de la masse de l'eau (m_w) évaporée lors de séchage dans l'étuve sur la masse des grains solides (m_s).

3.2 Principe de la mesure de la teneur en eau

Le principe de cet essai est conforme à la norme **NF P 94-050 (1995)** [4]. La perte d'eau d'un échantillon du sol est engendrée par étuvage (à 105°C pendant 24h), et les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

L'échantillon est pesé, puis introduit dans une étuve. Une fois la dessiccation réalisée, l'échantillon est pesé à nouveau. Les deux pesées donnent par différence la masse de l'eau évaporée.

3.3 Equipements et matériaux

Le matériel nécessaire pour cette expérimentation est le suivant (fig.1.4) :

- Un échantillon du sol.
- Une étuve.
- Une balance compatible avec les masses à peser.
- Des coupelles ou des boîtes en matériau non altérable à l'humidité et à la chaleur.

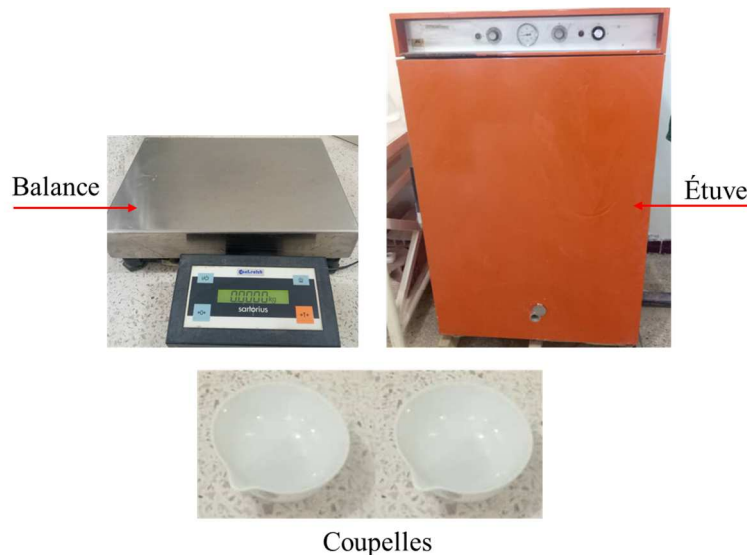


Figure 1.4 Matériels utilisés pour déterminer la teneur en eau au laboratoire.

3.4 Procédure de l'essai

Les différentes étapes pour réaliser cette manipulation sont :

- 1- Prendre un échantillon du sol.
- 2- Peser une coupelle qui doit être propre et sèche (m_1).
- 3- Placer l'échantillon dans la coupelle puis peser le tout (m_2).
- 4- Introduire la coupelle contenant l'échantillon dans une étuve à 105°C.
- 5- Après 24 heures, faire sortir la coupelle contenant l'échantillon du sol de l'étuve
- 6- Peser la coupelle contenant l'échantillon à nouveau (m_3).

3.5 Expression des résultats

La teneur en eau (w), exprimée en pourcentage, est calculée par la formule suivante :

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (1.7)$$

Avec :

$$m_w = m_2 - m_3$$

$$m_s = m_3 - m_1$$

Où :

m_w : est la masse d'eau évaporée.

m_s : est la masse des grains solides.

m_1 : est la masse de la coupelle

m_2 : est la masse de la coupelle contenant le sol avant étuvage.

m_3 : est la masse de la coupelle contenant le sol après étuvage.

Dans les sols grossiers comme les sables et les graviers, la teneur en eau (w) peut varier de quelques pour cent dans les sols secs à plus de 20 % dans les sols saturés. Dans les sols fins comme les limons et les argiles, la plage possible de (w) est beaucoup plus élevée en raison de la capacité des minéraux argileux à adsorber les molécules d'eau. La teneur en eau des sols à grains fins peut être aussi faible que quelques pour cent, et dépasser 100 % dans les argiles à plasticité plus élevée [2] [5].

3.6 Exemple de calcul

Au laboratoire, on a besoin de déterminer la teneur en eau d'un échantillon du sol donné. Les résultats suivant sont trouvés :

1. L'échantillon du sol et son contenant ont une masse de 500 g.
2. L'échantillon a été asséché toute une nuit dans une étuve et son contenant ont une masse de 402 g.
3. La masse du contenant utilisé pour la mesure de la teneur en eau est de 40 g.

La teneur en eau est calculée par la formule (1.7) :

$$w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad (1.7)$$

Avec :

$$m_w = 500 - 402 = 98 \text{ g.}$$

$$m_s = 402 - 40 = 362 \text{ g.}$$

En remplaçant ces valeurs dans la formule (1.7), on trouve :

$$w = \frac{98}{362} \times 100$$

$$w = 27 \%$$

Donc la teneur en eau, déterminée par la méthode d'étuvage, de cet échantillon du sol est $w = 27 \%$.

4. Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux essais (normalisés) permettant la détermination des caractéristiques pondérales des sols.

Dans un premier temps, la masse volumique des grains solides des sols a été mesurée avec la méthode du pycnomètre. Il est constaté que lors de la mesure de cette caractéristique spécifique, la source d'erreur la plus probable et qui influe les résultats de l'expérimentation, est la désaération inadéquate du mélange du sol, qui conduit à une sous-estimation des valeurs de (G_s). Cependant, la masse volumique des grains solides est un paramètre contrôlé par la minéralogie du sol. Dans les sols grenus tels que les sables et les graviers, où la minéralogie est dominée par le quartz et le feldspath, la densité des grains solides (G_s) est généralement d'environ 2,65. Dans les sols à grains fins, cette valeur est plus variable en raison de la présence de minéraux argileux, et peut varier de 2,70 à 2,85.

La masse volumique apparente des sols a été aussi déterminée par la méthode hydrostatique. Cette méthode est beaucoup utilisée pour les sols cohésifs car cette caractéristique de cohésion facilite l'opération de paraffinage de l'échantillon du sol. Elle est aussi utilisée pour mesurer la masse volumique des sols in situ.

La teneur en eau des sols a été mesurée par la méthode d'étuvage. Le facteur important qui influe les résultats de la mesure est la température utilisée pendant l'essai. En effet, une connaissance préalable de la nature des sols grenus, cohérents or organiques est nécessaire pour obtenir des valeurs de teneur en eau adéquates.

Ce chapitre nous a permis de connaître comment déterminer les paramètres physiques importants des sols et qui sont nécessaires pour définir et développer les différentes relations avec d'autres paramètres physiques du sol tels que : l'indice des vides, la porosité et le degré de saturation.

Chapitre II. Mesure des paramètres de consistance, et de la surface spécifique des sols fins

1. Mesure des paramètres de consistance (limite de liquidité et de plasticité)

1.1 Introduction

L'état des sols cohésifs est conditionné de manière cruciale par la composition des phases (solide, liquide et gazeuse). Toutefois, comme ces sols se trouvent généralement dans une phase saturée à partiellement saturée, il suffit souvent de caractériser leur état par la teneur en eau. Lorsqu'un sol cohésif est mélangé à une quantité excessive d'eau, il sera à l'état quelque peu liquide et s'écoulera comme un liquide visqueux. Cependant, lorsque ce pseudo-liquide visqueux est progressivement séché, avec la perte de la teneur en eau, il passe à un état plastique. Avec une réduction supplémentaire de la teneur en eau, le sol passera à un état semi-solide puis à un état solide.

La figure 2.1 montre la teneur en eau (en pourcentage) à laquelle un sol cohésif change de son état liquide à son état plastique, appelée limite liquidité (w_L). De même, les teneurs en eau (en pourcentage) auxquels le sol passe d'un état plastique à un état semi-solide et d'un état semi-solide à un état solide sont appelés respectivement la limite plasticité (w_P) et la limite de retrait (w_S). Donc, à certaines valeurs de teneur en eau, les sols présentent des propriétés appelées « limites d'Atterberg » [2] [6]. Dans cette partie du chapitre, la méthode et la procédure pour déterminer ces limites seront exposées.

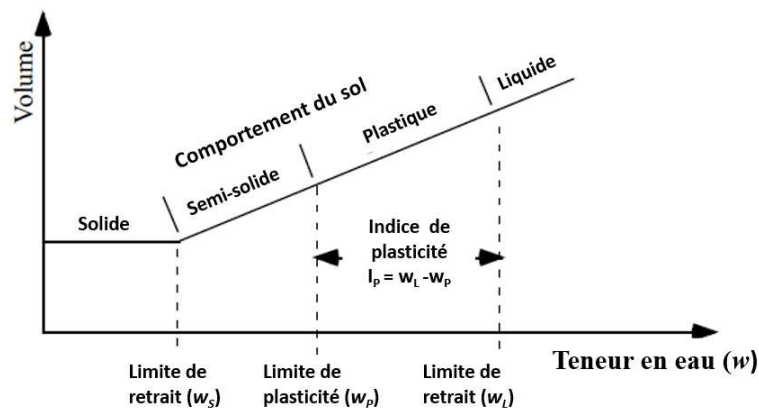


Figure 2.1 Relation entre le volume et la teneur en eau dans les sols fins [5].

1.2 Principe de l'essai

Ces limites sont donc des teneurs en eau pondérales obtenus à partir des essais effectués sur la fraction de matériau passant au tamis de 400 μm . L'essai s'effectue en deux phases (NF P 94-051 : 1993) [7].

- **Phase 1** : Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme sous 25 chocs répétés (en chute libre).
- **Phase 2** : Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixé et confectionné manuellement, se fissure.

1.3 Equipements et matériaux

Pour effectuer cette expérimentation, le matériel suivant est nécessaire :

- Un échantillon du sol fin tamisé à un tamis de 400 μm .
- Eau distillée.
- Une coupelle de Casagrande.
- Une spatule.
- Une balance.
- Une étuve.
- Des coupelles porcelaines.
- Une plaque lisse en marbre.



Figure 2.2 Equipements utilisés dans l'essai des limites d'Atterberg.

1.4 Détermination de la limite de liquidité

1.4.1 Procédure de l'essai

- Peser 5 récipients (m_1), vides et secs dans lesquels des petits échantillons du sol seront placés ultérieurement afin d'en mesurer la teneur en eau (fig.2.3).



Figure 2.3 Pesage des récipients utilisés pour mesurer les teneurs en eau lors de l'essai.

- ii. Prendre 200 g du tamisat à 400 μm , malaxer afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.
- iii. Répartir avec la spatule, dans une coupelle propre et sèche, une masse de pâte et l'étaler en plusieurs couches (fig.2.4. a).
- iv. Fixer délicatement la coupelle sur le support métallique de l'appareil de Casagrande (fig.2.4. b).



(a)



(b)

Figure 2.4 Étaler une couche de sol plane dans la coupelle avant le rainurage et la placer de l'appareil de Casagrande [8].

- v. Partager la pâte en deux au moyen de l'outil à rainurer, en le tenant perpendiculairement à la surface de la coupelle et en présentant sa partie biseautée face à la direction du mouvement (fig.2.5).

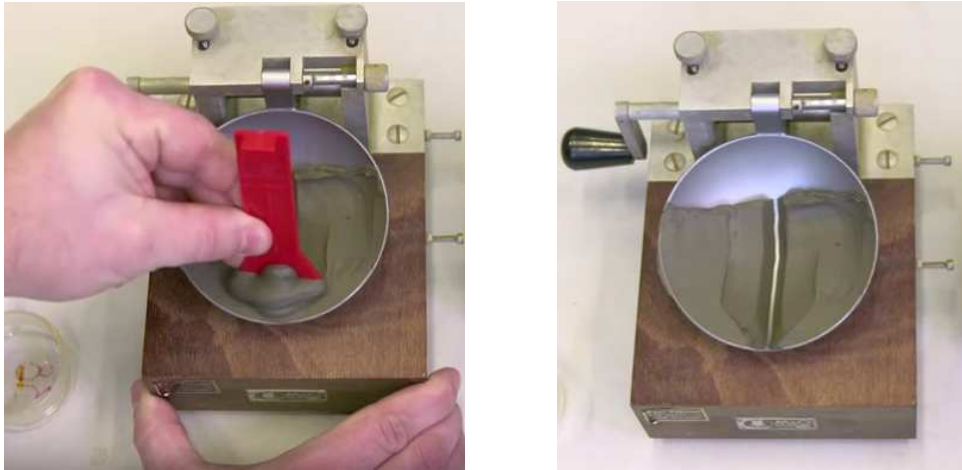


Figure 2.5 Réalisation de la rainure de la pâte [8].

- vi. Soumettre la coupelle à une série de chocs (sous l'effet de la gravité) à la cadence de 2 tours de manivelle/sec et observez attentivement la rainure.
- vii. Le sol des deux côtés de la coupelle commencera à couler vers le centre. Comptez le nombre de coups, N , pour que la rainure dans le sol se referme sur une longueur de ≈ 1 cm, puis arrêter le choc et noter le nombre N de chocs correspondants (fig.2.6).



Figure 2.6 Fermeture de la rainure après un nombre N de chocs [8].

Si N le nombre de chocs compté est inférieur à 15 ($N < 15$), l'opération de la mesure doit être refaite avec un échantillon du sol plus sec et homogénéisé à nouveau ; dans ce cas, le séchage sera accéléré éventuellement, par un malaxage sous un flux d'air chaud avec une température ne dépassant pas 50 °C.

Si $N > 35$, le processus de la mesure est renouvelé en ajoutant un peu d'eau distillée à la pâte du sol. La mesure de la limite de liquidité n'est effectuée que pour N compris entre 15 et 35.

- viii. Prélever ≈ 5 g de pâte de chaque côté des lèvres à l'endroit où elles se sont refermées (fig.2.7) et les mettre dans les récipients pesés dans l'étape n°1.



Figure 2.7 Prélèvement de la pâte à l'endroit de la fermeture de la rainure [8].

- ix. Peser aussitôt les récipients contenant les prélèvements de la pâte (m_2), puis les introduire dans l'étuve pour la dessiccation (m_3), afin d'en déterminer la teneur en eau en utilisant la méthode citée dans le chapitre I partie 3.
- x. La coupelle doit être nettoyée et bien séchée après chaque essai. L'opération complète est effectuée au moins 4 fois sur la même pâte, mais avec une teneur en eau différente à chaque fois.

Remarque

Pour les pâtes sableuses, une coupelle rugueuse doit être utilisée afin d'éviter la production d'un glissement sur les parois de la coupelle. En effet, la fermeture de la rainure pendant les chocs doit se produire par affaissement de la pâte dans sa masse et non par glissement sur la paroi de la coupelle, d'où la nécessité d'augmenter le frottement par l'utilisation d'une coupelle rugueuse.

1.4.2 Expression des résultats

a. Calcul de la teneur en mesurée

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

N : nombre de coups ; w : teneur en eau.

La teneur en eau est calculée par la formule suivante, et cela pour chaque point de la mesure effectuée :

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \quad (2.1)$$

Avec :

m_1 : masse des récipients vides.

m_2 : masse du récipient plus la pâte du sol humide.

m_3 : masse du récipient plus la pâte après dessiccation (après séchage dans l'étuve).

b. Tracé du graphe

Tracez un graphique semi-logarithmique entre la teneur en eau w (échelle arithmétique) et le nombre de coups, N (échelle logarithmique) (fig.2.8) : $w (\%) = f(\log N)$.

Ce graphe se rapproche d'une ligne droite. À partir de la ligne droite, déterminant la teneur en eau w (%) correspondant à 25 coups. C'est la limite de liquidité du sol w_L . Elle est exprimée en (%) et arrondie au nombre entier le plus proche.

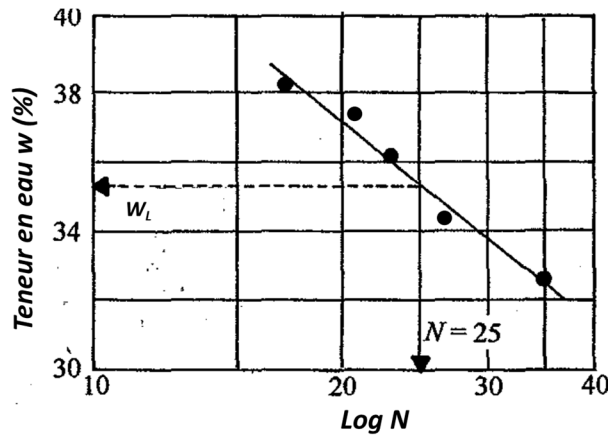


Figure 2.8 Exemple de tracé du graphe $w (\%) = f(\log N)$

1.5 Détermination de la limite de plasticité

1.5.1 Procédure de l'essai

La limite de plasticité est définie comme la teneur en eau à laquelle une tige du sol de $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ de diamètre commence à se fissurer. Elle est mesurée selon la procédure suivante :

- i. Peser 2 récipients (m_1) vides et secs dans lesquels des petits échantillons du sol seront placés ultérieurement afin d'en mesurer la teneur en eau
- ii. Former une boulette à partir de la pâte préparée (fig.2.9).



Figure 2.9 Préparation de la pâte de forme boulette [8].

- iii. Rouler la boulette sur une plaque lisse, à la main afin d'obtenir un rouleau d'un diamètre de 3 mm et 10 cm de longueur (fig.2.10).

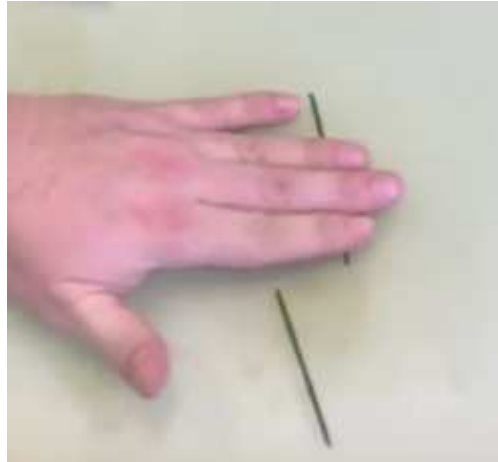


Figure 2.10 Confection d'un rouleau de la pâte de diamètre de $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ [8].

- iv. La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ (fig.2.11).

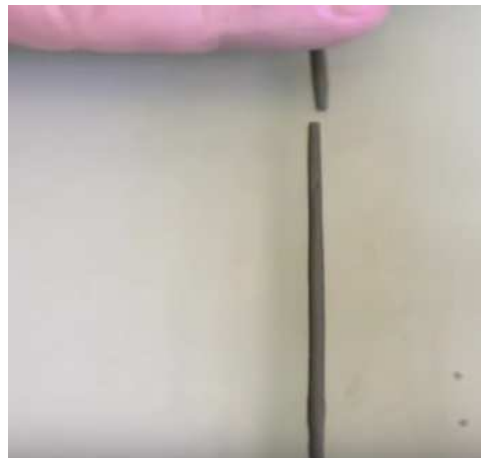


Figure 2.11 Fissuration du rouleau de la pâte à un diamètre de $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ [8].

- v. Si aucune fissure n'apparaît, il faut sécher légèrement la pâte et reformer un nouveau rouleau ;
- vi. Prélever, une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau et la placer dans les récipients et peser le immédiatement (m_2).
- vii. Introduire ces récipients dans l'étuve afin de mesurer sa teneur en eau (m_3).
- viii. Effectuer un deuxième essai pour une nouvelle boulette.

1.5.2 Expression des résultats

a. Calcul de La limite de plasticité w_P

La limite de plasticité w_P est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues des deux essais. Elle est déterminée par la relation suivante :

$$w_P = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 \quad (2.2)$$

A partir des valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité mesurés, on peut calculer le l'indice de plasticité I_P qui est la différence entre ces deux limites, comme suit :

$$I_P = w_L - w_P \quad (2.3)$$

La présence d'argile contribue à la plasticité du sol. La limite de liquidité d'un sol varie en fonction de la quantité et du type de minéraux argileux qui y sont présents. Le tableau 2.1 donne quelques fourchettes approximatives de la limite liquide et l'indice de plasticité de certains minéraux argileux.

Tableau 2.1 Limites d'Atterberg typiques pour les sols [9].

Type de sol	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)
Sable		Non plastique	
Limons	30-40	20-25	10-15
Argile	40-150	25-50	15-100
Kaolinite	50-60	30-40	10-25
Illite	95-120	50-60	50-70
Montmorillonite	290-710	50-100	200-660

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques intrinsèques du sol et elles ont une importance primordiale en mécanique des sols, puisqu'elles permettent de classer les sols suivants un diagramme de plasticité (fig.2.12), appelé aussi abaque de Casagrande.

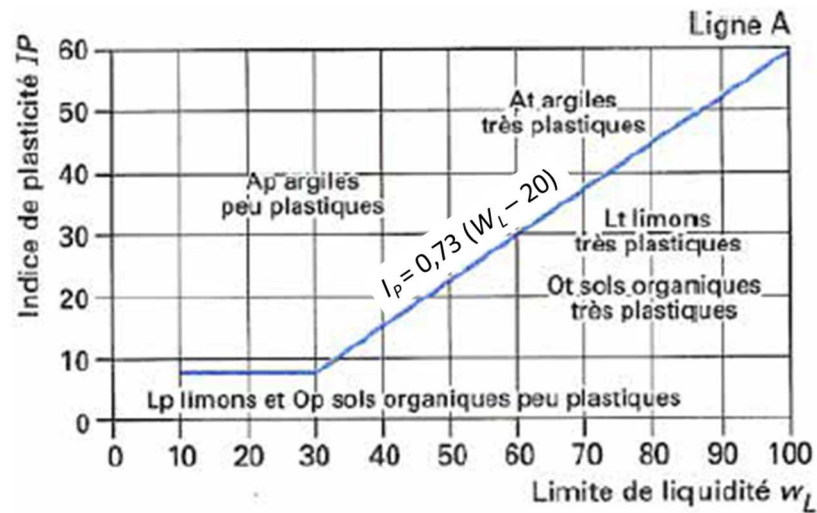


Figure 2.12 Abaque de Casagrande. Diagramme de plasticité et de classification des sols fins.

1.6 Exemple de calcul

Un essai de limite de liquidité, effectué sur un échantillon de sol dans le dispositif de Casagrande, a donné les résultats suivants :

N° d'essai	1	2	3
N° de la tare	9	18	26
Masse de la tare (m_1)	15,3	17	15,2
Masse de la tare + sol humide (m_2)	29,3	31,6	31,5
Masse de la tare + sol sec (m_3)	25,8	27,7	26,9
Teneur en eau w (%) = $\frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100$	33,34	36,45	39,3
Nombre de coups (N)	35	23	17

Deux essais de la limite de plasticité ont donné des teneurs en eau de 20,3 % et 20,8 %. Déterminez :

- La limite de liquidité et la limite de plasticité,
- L'indice de plasticité.

Pour obtenir la limite de liquidité, on doit tracer un graphique semi-logarithmique de la teneur en eau en fonction du nombre de coups, en utilisant les données de l'essai. Puis la limite de liquidité sera extraite de la courbe tracée (teneur en eau correspondant à 25 coups).

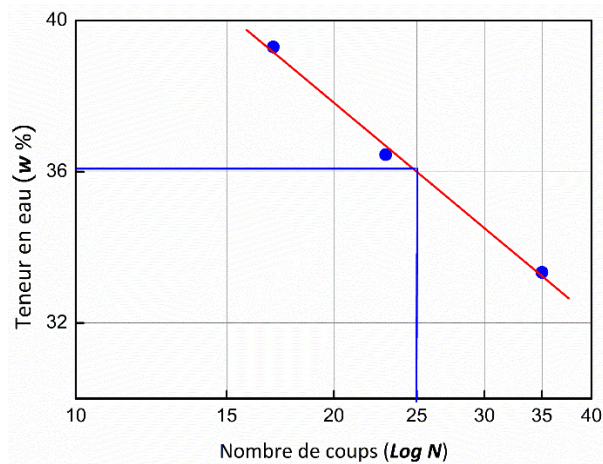


Figure 2.13 Tracé du graphe de la ligne d'état liquide pour la limite de liquidité par la méthode de la coupelle Casagrande.

A partir du graphe (fig.2.12), la limite de liquidité trouvée est égale à une teneur en eau $w = 36,2 \%$ pour un nombre de coups correspondant à $N = 25$.

Pour déterminer la limite de plasticité, deux mesures ont été effectuées ; on remarque que la différence dans les résultats était faible. Donc la limite de plasticité est la valeur moyenne de la teneur en eau mesurée.

Donc w_P est calculée comme suit :

$$w_P = \frac{20,3 + 20,8}{2} \times 100 = 20,6 \%$$

On déduit l'indice de plasticité des deux valeurs déterminées ci-dessus, et on trouve :

$$I_P = w_L - w_P = 36,2 - 20,6 = 15,6 \%$$

Ainsi, ce sol à une limite de liquidité $w_L = 36,2 \%$, une limite de plasticité $w_P = 20,6 \%$ et un indice de plasticité $I_P = 15,6 \%$. D'après les résultats obtenus dans cet exemple, la classification du sol selon l'abaque de Casagrande (fig.2.12) est : une argile peu plastique (A_p).

2. Mesure de la sensibilité à l'eau ; essai au bleu de méthylène

2.1 Introduction

L'essai au bleu de méthylène permet la détermination de la sensibilité à l'eau et la nature minéralogique de la fraction argileuse d'un sol. L'essai est dit « à la tâche » et mesure ainsi la surface spécifique totale (interne + externe) des particules argileuses du sol.

2.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer, par dosage, la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau et cela selon la norme NF P 94-068 : 1998 [10]. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache.

2.3 Equipements et matériaux

Le matériel ainsi que le matériau utilisés (fig.2.14) dans cette manipulation sont cités ci-dessous :

- Un échantillon du sol tamisé au tamis 5 mm de diamètre.
- Un dispositif de dosage permettant d'injecter par pas de 10 cm^3 , 5 cm^3 et 2 cm^3 des volumes de solution de bleu et de connaître la quantité totale injectée à $\pm 1 \text{ cm}^3$.
- Un agitateur magnétique.
- Un récipient cylindrique (en verre, plastique).
- Une baguette de verre.
- Papier filtre blanc.
- Une solution de bleu de méthylène dosée à $10 \pm 0,1 \text{ g/l}$.



Figure 2.14 Equipements utilisés dans l'essai de bleu de méthylène.

2.4 Procédure de l'essai

Cet essai est réalisé en respectant les étapes suivantes :

- i. Prélever 10 g du sol sec tamisé au tamis 5 mm.
- ii. La prise est mise en suspension dans 100 cm³ dispersée à l'aide de l'agitateur pendant 5 min.
- iii. À l'aide du dispositif de dosage, introduire dans la suspension 5 cm³ de bleu, au bout de 1 min.
- iv. Prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre (fig.2.15).

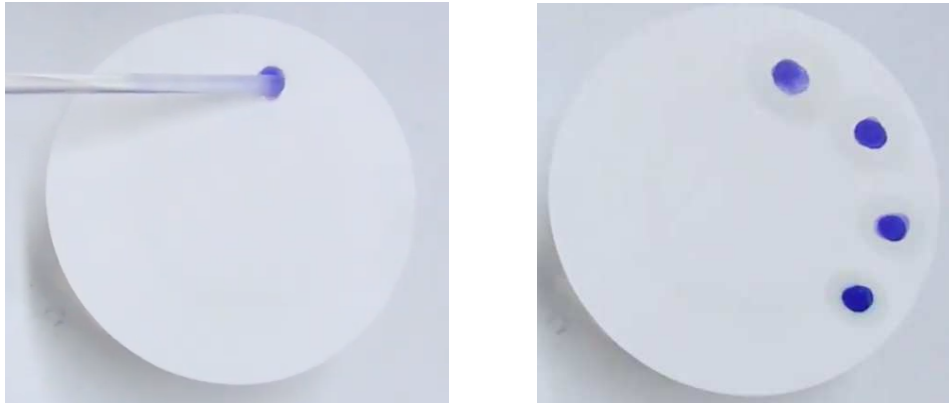


Figure 2.15 Prélèvement d'une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre [11].

- v. Procéder à des injections successives par pas de 5 cm³ de solution de bleu jusqu'à ce qu'apparaisse une auréole périphérique bleu clair (fig.2.16). L'essai est dit alors positif. À partir de ce moment, laisser se poursuivre l'adsorption du bleu dans la solution et effectuer des taches, de minute en minute, sans ajout de solution (réaliser 5 essais successifs).

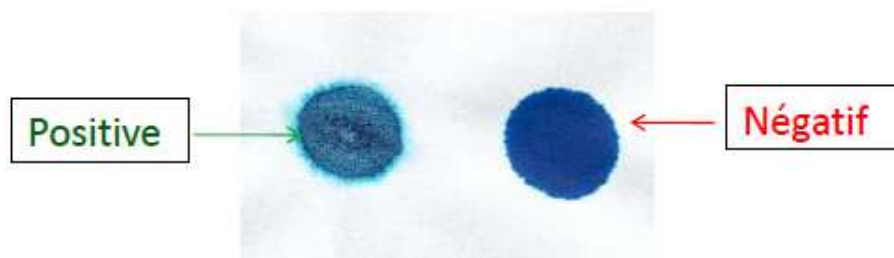


Figure 2.16 Vérification de l'activité du sol.

- vi. Si l'essai redevient négatif à la cinquième tache ou avant, procéder à de nouvelles injections de bleu avec des pas de 2 cm³.
- vii. Ces opérations sont renouvelées jusqu'à ce que l'essai reste positif pour cinq taches consécutives. Le dosage est alors terminé et l'on détermine le volume total (V) de la solution de bleu qui a été nécessaire pour atteindre l'adsorption totale (fig.2.17).

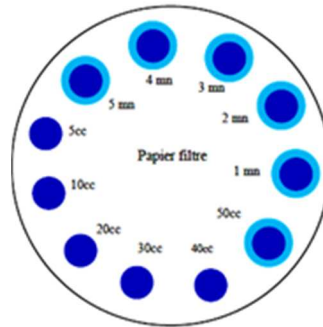


Figure 2.17 Résultats d'un essai de bleu de méthylène.

2.5 Expression des résultats

La valeur de bleu, notée VBS et exprimée en grammes de bleu de méthylène par 100 g de matériau, est la quantité de ce colorant qui est nécessaire pour recouvrir d'une couche monomoléculaire les surfaces internes et externes de toutes les particules argileuses présentes dans 100 g de sol.

Pour les matériaux dont le D_{\max} est inférieur à 5 mm, l'expression du résultat est :

$$VBS = \frac{B}{m} \times 100 \quad (2.4)$$

Avec :

m : masse sèche de la prise d'essai (g).

B : masse de bleu introduite (solution à 10 g/l).

On a :

$$B = V \times 0,01 \quad (2.5)$$

V : est le volume total de la solution de bleu.

Les différences des valeurs de bleu VBS reflètent la complexité de la structure des particules argileuses (tableau 2.2).

Tableau 2.2 Valeurs de bleu (en g de bleu/100 g de sol) [12].

Minéraux	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Valeur de bleu VBS	1	3,6	31

Cet essai permet aussi à déterminer la sensibilité des sols à l'eau (tableau 2.3).

Tableau 2.3 Valeurs de VBS en fonction de la sensibilité à l'eau [13].

VBS	Sensibilité à l'eau
< 0,1 (ou 0,2)	sol insensible à l'eau
0,2 – 1,5	sol sablo-limoneux
1,5 – 2,5	sol sablo-argileux
2,5 - 6	sol limoneux plasticité moy.
6 – 8	sol argileux
> 8	sol très argileux

Cet essai permet aussi à déterminer la surface spécifique totale (S_{ST} en m^2/g) des sols argileux, en utilisant la formule suivante :

$$S_{ST} [m^2/g] = 21 \times VBS \quad (2.6)$$

Le tableau 2.4 donne des valeurs de la surface spécifique pour quelques minéraux.

Tableau 2.4 Valeurs de la surface spécifique (m^2/g) [14].

Minéraux	Sable propre	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Surface spécifique (m^2/g)	2×10^4	10 - 70	80 - 100	500

2.6 Exemple de calcul

Déterminer la valeur de bleu méthylène et déduire la surface spécifique totale du sol. Les résultats de l'essai au bleu de méthylène effectué sur ce sol sont les suivants :

Le volume total de la solution de bleu adsorbé par $m = 120$ g du sol est trouvée égale à $V = 15$ ml.

a. Calcul de la VBS

Pour calculer la VBS du sol, en utilisant la formule (2.4) :

$$VBS = \frac{B}{m} \times 100$$

On a :

$$B = V \times 0,01 = 15 \times 0,01 = 0,15 \text{ g.}$$

Donc :

$$VBS = \frac{0,15}{120} \times 100 = 0,125.$$

b. Calcul de la SST

Pour calculer la S_{ST} du sol, en utilisant la formule (2.6) :

$$S_{ST} [m^2/g] = 21 \times VBS = 21 \times 0,125 = 2,625 \text{ m}^2/g.$$

D'après la valeur de la VBS trouvée est $0,125 < 0,2$, le sol est classé suivant le tableau 2.3 comme un « sol insensible à l'eau ».

3. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la détermination des caractéristiques importantes des sols qui sont les limites d'Atterberg et l'argilosité ou l'activité. Cependant, les essais de la limite de liquidité et de plasticité fournissent des informations concernant l'effet de la teneur en eau (w) sur les propriétés mécaniques du sol. Plus précisément, les effets de la teneur en eau sur la variation de volume et la consistance du sol. Les résultats de cet essai sont utilisés pour classer les sols conformément à la classification LCPC/USCS, et pour estimer le potentiel de gonflement des sols à travers l'indice de plasticité. L'essai de bleu de méthylène permet de déterminer la surface spécifique d'une argile à travers la mesure de la valeur de VBS. Cette mesure fournit des informations sur la nature des minéraux constituant le sol.

Chapitre III. Analyse Granulométrique

1. Introduction

Afin de classer un sol à des fins d'investigations géotechniques, il faut connaître la répartition de la taille des grains dans une masse de sol donnée. L'analyse granulométrique d'un sol se fait selon deux méthodes qui se complètent : par tamisage et par sédimentation. L'objectif de ces essais est de déterminer la distribution de la taille des grains (c'est-à-dire la taille des grains par rapport au pourcentage en poids) du sol, et de déterminer le pourcentage de fines (c'est-à-dire les matières passant au tamis du diamètre 80 μm). Ces informations sont utilisées pour classer le sol conformément au système unifié de classification des sols LPC et USCS.

2. Principe des essais et modes opératoires

2.1 Analyse Granulométrique par Tamisage à Sec (norme NF P 94-056 : 1996)

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau. Après séchage dans l'étuve, ce sol est fractionné au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis [15]. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est apportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

Remarque

La norme NF P 94-056 : 1996 a été remplacée par la norme NF EN ISO 17892-4 (janvier 2018).

2.2 Analyse Granulométrique par Sédimentation (norme NF P 94-057 : 1992)

Dans certains cas, la courbe granulométrique ne peut pas être quantifiée de manière fiable à des tailles de grains plus petites (moins d'un millimètre) en utilisant des tamis puisque les plus petites particules d'argile dans le sol forment des mottes et ne peuvent pas passer à travers les tamis individuellement. Toutefois, cette partie de la courbe de granulométrie peut être définie à l'aide d'une analyse par sédimentation de la fraction du sol passant au tamis 80 μm [16]. En conséquence, l'essai utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins à très fins est fonction de leurs dimensions. La loi de Stokes donne, dans le cas des grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre et leur vitesse de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents des particules.

Remarque

La norme NF 94-057 : 1992 a été remplacée par la norme NF EN ISO 17892-4 (janvier 2018).

2.3 Equipements et matériels

2.3.1 Analyse Granulométrique par Tamisage à Sec

- Un jeu de tamis emboîtables à mailles d'ouvertures carrées.
- Couvercles et fonds de tamis de même diamètre que les tamis
- Récipients en matériau non altérable, brosse, pinceau.
- Balances.
- Une tamiseuse (facultative).

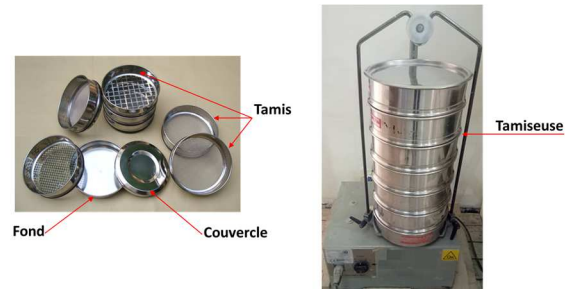


Figure 3.1 Les tamis et la tamiseuse utilisés dans l'essai

2.3.2 Analyse Granulométrique par Sédimentation

- Bac en matériau non altérable.
- Balances.
- Etuve.
- Agitateur mécanique.
- Agitateur manuel.
- Eprouvettes d'essai.
- Eau distillée.
- Déflocculant.
- Densimètre.
- Chronomètre.
- Thermomètre.

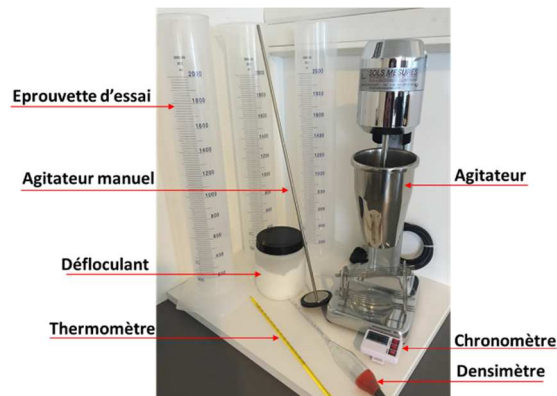


Figure 3.2 Appareillage de l'essai de sédimentation

2.4 Procédure des essais

2.4.1 Analyse Granulométrique par Tamisage à Sec

- Peser les tamis vides.
- Fixer les tamis par ordre décroissant dans la tamiseuse (10 mm, 5 mm, 2 mm, 1 mm, 0,4 mm, 0,2 mm, 0,08 mm).
- Verser $M_s = 1$ kg du sol sec (séché à l'étuve à 105°C pendant 24h) dans le haut de la série des tamis.
- Fermer avec le couvercle.

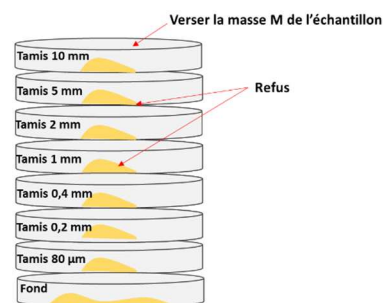


Figure 3.3 Procédure de l'essai de tamisage à sec

- Lancer la tamiseuse pendant environ 5 à 10 min.
- Peser la masse du refus de chaque tamis notée M_n .

2.4.2 Analyse Granulométrique par Sédimentation

- Prendre un échantillon du sol de 40 g passant au tamis de 80 μm .
- Imbiber l'échantillon dans l'agitateur mécanique puis ajouter 500 cm^3 d'un mélange de dispersion constitué de 440 cm^3 d'eau distillée 60 cm^3 de défloculant (hexamétaphosphate de sodium).
- Disperser le mélange au moyen de l'agitateur mécanique pendant 3 mn à $v = 10\,000$ tr/mn.
- Verser la suspension immédiatement après fin de l'agitation dans une éprouvette en rinçant le récipient, l'arbre et les palettes de l'agitateur.
- Compléter par de l'eau distillée jusqu'à 1000 cm^3 .
- Verser 1000 cm^3 de l'eau distillée dans une 2^{ème} éprouvette témoin et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propres (fig.3.4).
- Agiter verticalement la suspension avec l'agitateur manuel pour obtenir une concentration uniforme.

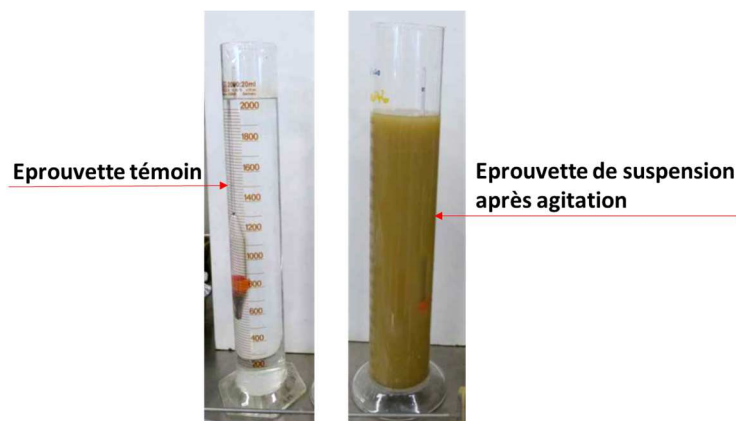


Figure 3.4 Préparation de l'éprouvette de suspension et témoin pour l'essai de sédimentation

- Retirer l'agitateur et déclencher au même temps le chronomètre : c'est le début de l'essai.
- Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après déclenchement du chronomètre.
- Prendre les lectures depuis le début de l'essai aux temps suivants en minutes : 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 60. Cette lecture est notée « R ».
- Noter à chaque lecture la densité de la suspension et la température de l'eau trouvée dans l'éprouvette témoin.
- Faire les lectures du densimètre au sommet du ménisque (voir fig.3.5).

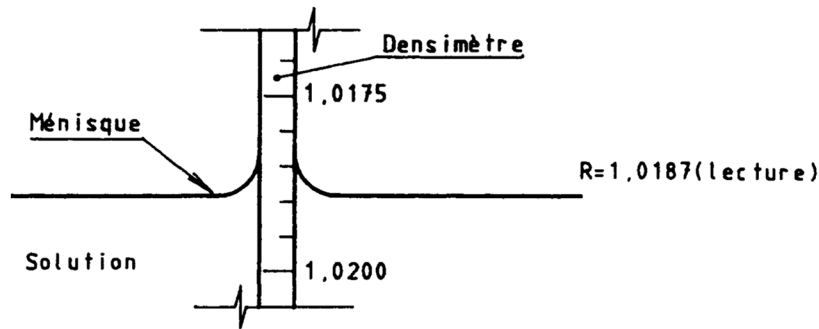


Figure 3.5 Procédure de la lecture sur le densimètre [16].

- Faire les trois premières lectures 0,5, 1 et 2 min, sans retirer le densimètre de la suspension.
- A partir de la troisième lecture, le densimètre est retiré de la solution après chaque mesure, le nettoyer puis le plonger dans l'éprouvette témoin.
- Plonger le densimètre dans la solution au moins 30 s avant chaque mesure.
- Après chaque lecture de densité, retirer le densimètre de l'éprouvette de la suspension et l'introduit dans l'éprouvette témoin.
- Prendre la lecture de la densité de la solution trouvée dans l'éprouvette témoin notée « Rt ».

Remarque

Le tamisage par voie humide (sous l'eau) consiste à séparer par lavage les grains agglomérés (par la présence d'un sol cohérent) d'un échantillon d'une masse connue de matériau. Puis à les fractionner au moyen d'une série de tamis et à peser successivement après séchage à l'étuve le refus cumulé sur chaque tamis. Les dimensions nominales d'ouverture des mailles des tamis et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et des seuils granulométriques utilisés dans la classification.

2.5 Expression des résultats

2.5.2 Analyse Granulométrique par Tamisage à Sec

- a. Calcul du pourcentage massique des refus

$$R_n(\%) = \left(\frac{M_n}{M_s} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

- b. Calcul du pourcentage massique des refus cumulés

$$R_c(\%) = \sum_{i=1}^{i=n} R_n \quad (3.2)$$

- c. Calcul du pourcentage massique des passants cumulés

$$P(\%) = 100 - \sum_{i=1}^{i=n} R_n \quad (3.3)$$

d. Calcul des facteurs de courbure et d'uniformité

Coefficient de courbure est calculé par la formule suivante :

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{(d_{10}) \times (d_{60})} \quad (3.4)$$

Coefficient d'uniformité est déterminé par la formule suivante :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.5)$$

Avec : d_{10} , d_{30} et d_{60} sont respectivement, les diamètres correspondant au pourcentage de tamisat cumulé de 10%, 30% et 60%.

- e.** Tracer la courbe granulométrique des pourcentages de tamisat cumulé en fonction de diamètre des grains.
- f.** Classifier le sol selon la classification LPC et USCS.

2.5.2 Analyse Granulométrique par Sédimentation

a. Calcul de diamètre des grains

L'analyse granulométrique à l'aide d'un densimètre est basée sur le principe de la sédimentation des grains du sol dans l'eau. Lorsqu'un échantillon de sol est dispersé dans l'eau, les particules se déposent à des vitesses différentes, selon leur forme, leur taille, leur poids et la viscosité de l'eau. Pour simplifier, il est supposé que toutes les particules de sol sont des sphères et que la vitesse des particules de sol peut être exprimée par la loi de Stokes, selon laquelle [2] :

$$v = \frac{[\gamma_s - \gamma_w]}{18\eta} D^2 \quad (3.6)$$

Où :

v : la vitesse

D : diamètre des particules du sol

η : viscosité de l'eau

γ_s : poids volumique des particules du sol

γ_w : poids volumique de l'eau.

Ainsi à partir de l'équation (3.6) :

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{\gamma_s - \gamma_w}} \sqrt{\frac{H_t}{t}} \quad (3.7)$$

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

t : le temps de la lecture de la densité.

b. Calcul de la profondeur effective du centre de poussée H_t

$$H_t = H - 100 \times H_1 \times (R - R_t) - H_C \quad (3.8)$$

H : la distance séparant le milieu du bulbe du densimètre de la graduation 1,0000 ($H = 22,2$ cm).

H_1 : la distance séparant la graduation 1,0000 de la graduation 1,0100 ($H_1 = 3,8$ cm).

R : la lecture effectuée par le densimètre (au sommet du ménisque) à l'instant t .

R_t : la lecture effectuée par le densimètre dans l'éprouvette témoin.

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

$H_c = 0$ pour les trois premières lectures. A partir de la quatrième lecture :

$$H_c = 0,5 \frac{V_d}{A} \quad (3.9)$$

Avec :

V_d : le volume du densimètre ($V_d = 73$ cm³).

A : l'aire de la section droite de l'éprouvette d'essai ($A = 57$ cm²).

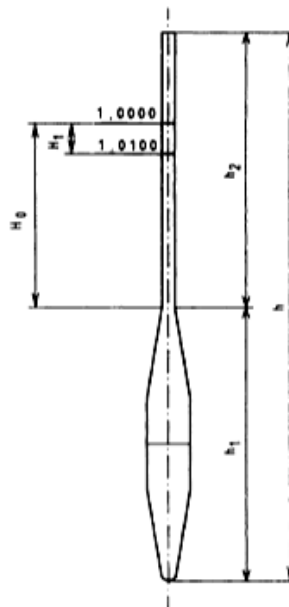


Figure 3.6 Représentation des caractéristiques géométriques du densimètre [16]

c. Calcul de la viscosité dynamique

La viscosité dynamique de la solution à l'instant t et à la température θ° de l'expérience est donnée par la formule suivante :

$$\eta = \frac{0,00179}{1 + \alpha\theta + \beta\theta^2} \quad (3.10)$$

Avec :

θ : la température en ($^\circ$ C) de l'éprouvette témoin à l'instant t .

$\alpha = 0,03368$

$\beta = 0,00022$

d. Calcul du pourcentage des particules de diamètre $\leq D$

$$Y(\%) = 100 \times \frac{V}{M} \times \frac{G_s}{G_s - 1} \times \rho_w (R - 1) \quad (3.11)$$

- e. Tracer la courbe granulométrique des pourcentages des particules en fonction de leurs diamètres.

2.6 Classification du sol

L'objectif des systèmes de classification des sols est de mettre les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Ils permettent donc de grouper les très nombreux échantillons recueillis au cours d'une campagne de sondages et d'établir des coupes géotechniques du terrain. Les systèmes de classification les plus utilisés sont : la classification des Laboratoires des Ponts et Chaussées « LPC », et la classification Unified Soil Classification System « USCS » [12]. L'approche la plus courante pour la classification est de diviser les sols sur la base de leur granularité et de leur plasticité. La division est effectuée en fonction de la proportion des fractions granulaires présentes dans les fractions de sol granulaires des plus gros grains, déterminées sur l'échantillon tout entier, et en fonction de la plasticité des fractions granulaires les plus fines [17].

Ces classifications utilisent les résultats d'essais classiques d'identification des sols, tels que :

a. *Des critères granulométriques*

- Les pourcentages de gravier, sable et particules fines (tamisats à 2 mm et 0,08 mm).
- la forme de la courbe granulométrique :
 - Coefficient d'uniformité ou de Hazen C_u .
 - Coefficient de courbure C_c .

b. *Les caractéristiques de plasticité*

La limite de liquidité w_L et l'indice de plasticité I_p , et la ligne A d'équation :

$I_p = 0,73 (w_L - 20)$ (relation de Casagrande, décrite dans le chapitre 2, cf. figure 3.8).

c. *La teneur en matières organiques.*

Pour classifier le sol selon les critères cités ci-dessous, les abaques suivants seront utilisés :

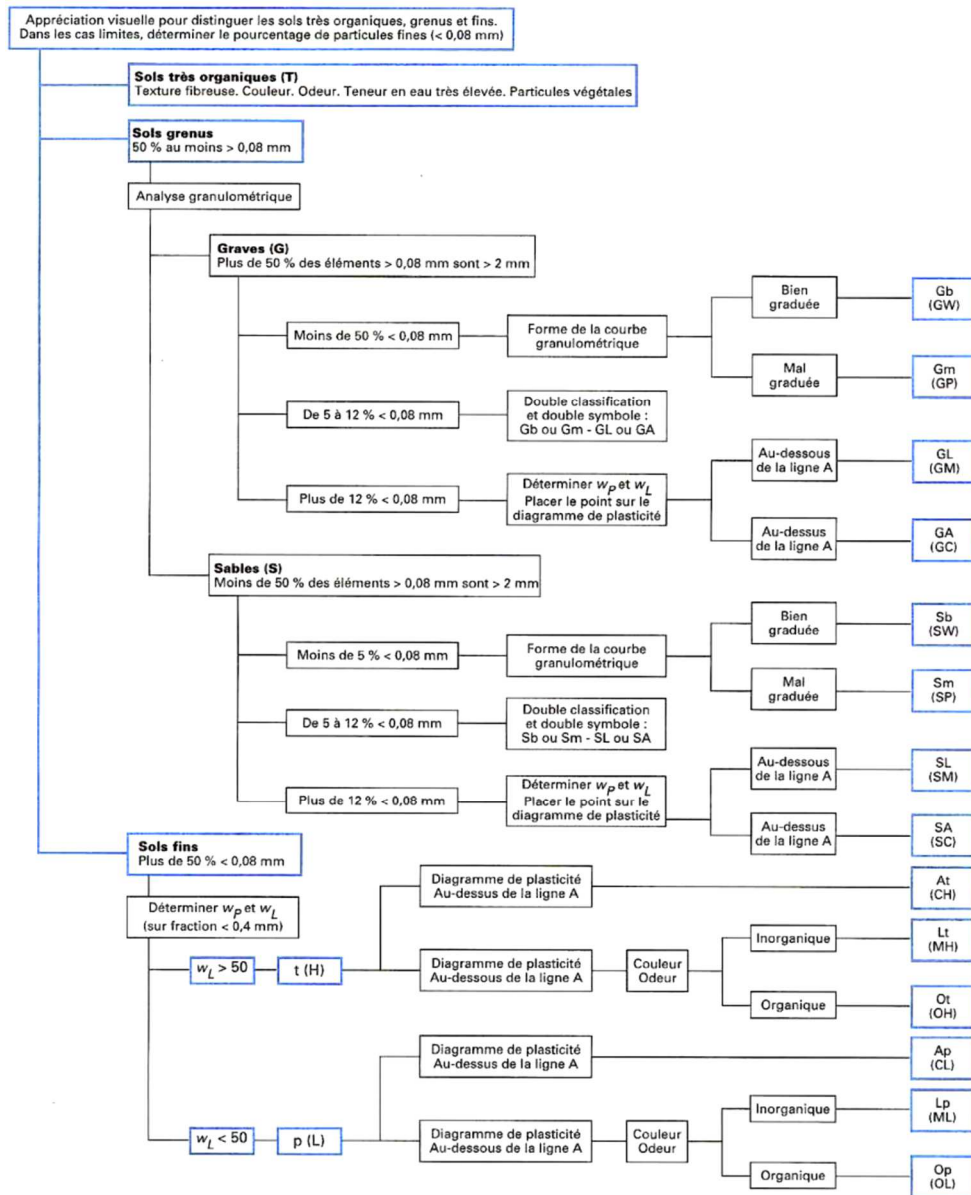


Figure 3.7 Classification des sols LPC/USCS [12].

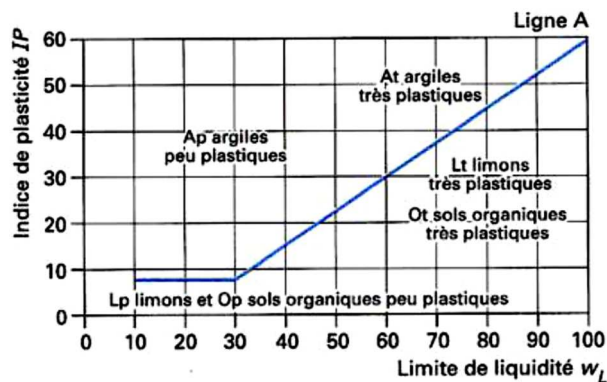


Figure 3.8 Classification des sols fins. Diagramme de plasticité de Casagrande [12].

3. Exemple de calcul

3.1 Analyse granulométrique par tamisage à sec

Une analyse granulométrique par tamisage à sec a été réalisée au laboratoire sur un échantillon du sol de masse sèche égale à 1kg. Les résultats trouvés sont donnés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Résultats de l'analyse granulométrique par essai de sédimentation.

Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus partiels R_n (g)
10	78,4
5	27,6
2	83,2
1	156,8
0,4	319,6
0,2	183,2
0,08	119,8
Fond	23,4

a. Calcul du pourcentage massique des passants cumulés

D'après les équations (3.1), (3.2) et (3.3), on peut dresser le tableau suivant :

Tableau 3.2. Feuille de calcul pour l'essai de l'analyse granulométrique par tamisage à sec.

Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus partiels R_n (g)	Masse des refus cumulés R_c (g)	Pourcentage des refus cumulés (%)	Pourcentage des tamis cumulés (%)
10	78,4	78,4	7,90	97,22
5	27,6	106	2,78	92,10
2	83,2	189,2	8,39	91,61
1	156,8	346	34,88	65,12
0,4	319,6	665,6	67,10	32,90
0,2	183,2	848,8	85,56	14,44
0,08	119,8	968,6	97,64	2,36
Fond	23,4	/	/	/
$M_s=$	$23,4 + 968,6 = 992$	/	/	/

b. Tracé de la courbe granulométrique

La distribution de la taille des grains obtenue à partir de l'analyse granulométrique par tamisage à sec est tracée sur un graphe semi-logarithmique, avec la taille des grains représenté sur l'axe des abscisses avec une échelle logarithmique, et le pourcentage de tamis cumulés représenté sur l'axe des ordonnées avec une échelle naturelle. La fig.3.9 est une représentation graphique de la distribution de diamètre des grains pour le calcul indiqué dans le tableau 3.2.

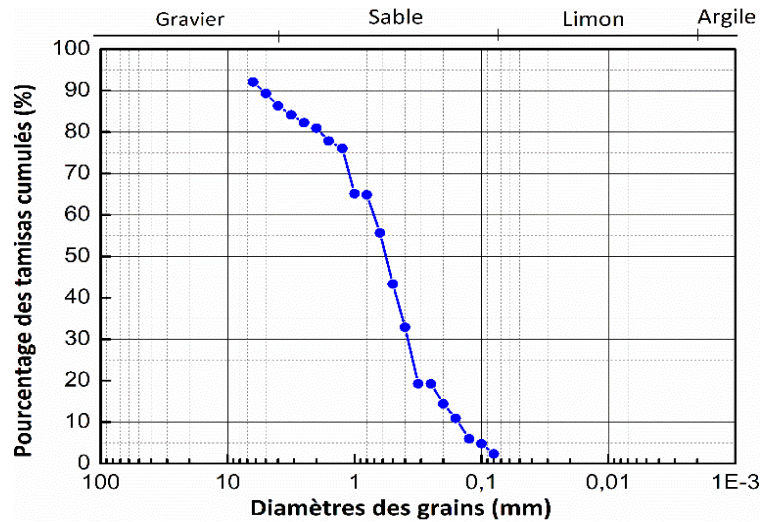


Figure 3.9 Courbe granulométrique de l'analyse par tamisage à sec.

c. Calcul des facteurs de courbure et d'uniformité

Afin de calculer les coefficients de courbure et d'uniformité, on doit déterminer d'abord les diamètres D_{10} , D_{30} et D_{60} pour les pourcentages de tamis cumulé de 10 %, 30 % et 60 %, respectivement.

Le coefficient de courbure est calculé par la formule (3.4), et le coefficient d'uniformité est déterminé par la formule (3.5).

Tableau 3.3 Calcul des coefficients d'uniformité et de courbure.

D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_c	C_u
0,16 mm	0,38 mm	0,70 mm	1,29	4,38

Le coefficient de courbure trouvé est compris entre 1 et 3 alors que le coefficient d'uniformité est inférieur à 6, ce qui signifie que c'est un sable propre mal gradué.

3.2 Analyse granulométrique par sédimentation

En effectuant une analyse granulométrique par essai de sédimentation sur la fraction du sol passant au tamis 80 μm , on a eu les mesures ci-dessous (tableau 3.4).

Tableau 3.4 Résultats de l'analyse granulométrique par essai de sédimentation.

Temps (min)	Température ($^{\circ}\text{C}$)	Lectures R	Lectures R_t
0,5	23	1,0235	1
1	23	1,0225	1
2	23	1,0205	1
5	23	1,0185	1
10	23	1,0155	1
20	23	1,0135	1
60	23	1,013	1

Pour la première lecture $R = 1,0235$ effectuée à l'instant $t = 0,5$ min, on calcule :

a. « H_t » est déterminé à partir de l'équation (I.8), comme suit :

$$H_t = 22,2 - 100 \times 3,8 \times (1,0235 - 1) - 0 = 13,27 \text{ cm}$$

b. « D » le diamètre équivalent des particules solides est déterminé en utilisant l'équation (3.7) :

$$D = \sqrt{\frac{18\eta}{\gamma_s - \gamma_w}} \sqrt{\frac{H_t}{t}} \quad (3.7)$$

On doit calculer tout d'abord la viscosité dynamique « η » à l'aide de la formule (3.10) :

$$\eta = \frac{0,00179}{1 + \alpha\theta + \beta\theta^2} \quad (3.10)$$

On a : $\theta = 23^\circ\text{C}$; $\alpha = 0,03368$; $\beta = 0,00022$, en remplaçant ces valeurs dans l'équation (3.10), on trouve :

$$\eta = \frac{0,00179}{1 + \alpha\theta + \beta\theta^2} = \frac{0,00179}{1 + 0,03368 \times 23 + 0,00022 \times (23)^2} = 9,46 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$$

Alors, on a :

$$\gamma_s = 25 \text{ kN/m}^3 ; \gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3 ; t = 0,5 \text{ min.}$$

$$D = \sqrt{\frac{18 \times 9,46 \times 10^{-4}}{(25-10) \times 10^3}} \sqrt{\frac{13,27 \times 10^{-2}}{0,5 \times 60}} = 7 \times 10^{-5} \text{ m} = 0,070 \text{ mm.}$$

c. « Y (%) » le pourcentage des particules solides est calculé par la formule (3.11) :

$$Y(\%) = 100 \times \frac{V}{M} \times \frac{G_s}{G_s - 1} \times \rho_w (R - 1) \quad (3.11)$$

On a : $M = 40 \text{ g} = 0,04 \text{ kg}$; $V = 1000 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$; $G_s = 2,5$, $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, en remplaçant ces valeurs dans l'équation (I.11), on trouve :

$$Y(\%) = 100 \times \frac{10^{-3}}{0,04} \times \frac{2,5}{2,5 - 1} \times 1000 (1,0235 - 1) = 97,91 \%$$

En suivant les mêmes calculs, on peut dresser le tableau suivant :

Tableau 3.5 Exemple de calcul pour l'essai de l'analyse granulométrique par sédimentation.

Temps (min)	Température (°C)	Lectures R	Lectures R_t	H_t (cm)	D (mm)	P (%)
0,5	23	1,0235	1	13,270	0,070	97,91
1	23	1,0225	1	13,650	0,0513	93,75
2	23	1,0205	1	14,410	0,0373	85,42
5	23	1,0185	1	14,530	0,0237	77,08
10	23	1,0155	1	15,670	0,0174	64,58
20	23	1,0135	1	16,430	0,0124	56,25
60	23	1,013	1	16,620	0,0072	54,17

d. Tracé de la courbe granulométrique

La courbe de l'analyse par sédimentation est représentée sur un graphe semi-logarithmique, dont l'axe des abscisses est en logarithme décimal qui représente les diamètres équivalents des

grains solides ; et l'axe des ordonnées est une échelle linéaire qui représente le pourcentage des fines (fig. 3.10).

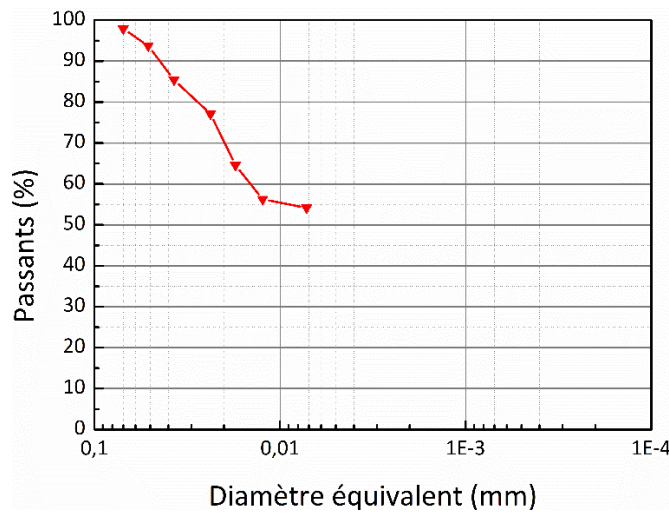


Figure 3.10 Courbe granulométrique de l'analyse par sédimentation.

Finalement, la courbe granulométrique combinée des deux essais d'analyse par essai de tamisage et essai de sédimentation est représentée sur la fig. 3.11. Afin de tracer cette courbe, il faut calculer le pourcentage pour les passants équivalents déterminés par l'essai de sédimentation pour l'échantillon total du sol, en utilisant la formule suivante :

$$P_T(\%) = \frac{Y(\%) \times (P_{80\ \mu m})}{100} \tag{3.12}$$

Où :

$P_{80\ \mu m}$: le pourcentage des passants au tamis 80 μm .

$Y(\%)$: le pourcentage des particules fines déterminé par l'essai de sédimentation.

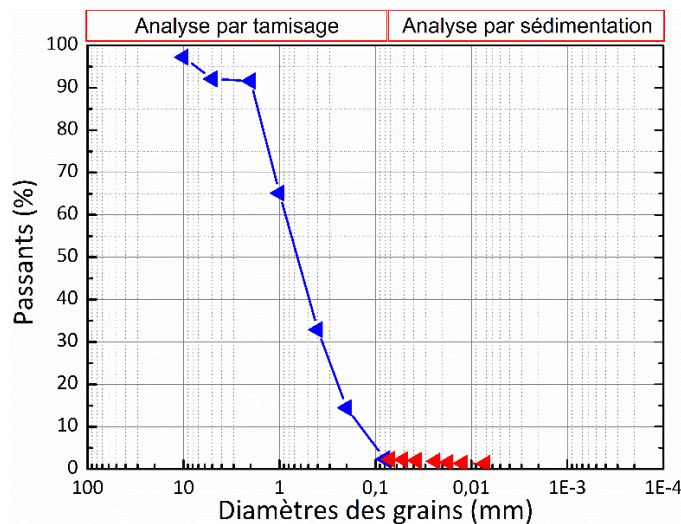


Figure.3.11. Courbe de distribution de la taille des grains combine les résultats de l'analyse par tamisage et de l'analyse par sédimentation.

3.3 Classification du sol

La classification du sol se fait à l'aide des abaques illustrés par les fig.3.7 et 3.8.

D'après la fig.3.7 et les coefficients de courbure trouvé compris entre 1 et 3 et d'uniformité est inférieur à 6 ; c'est donc un sable mal gradué Sm (SP).

Si le cas où ce sol contient des particules fines plastiques, on doit déterminer la limite de liquidité w_L et la limite de plasticité w_P , et en déduisant l'indice de plasticité I_p . (Voir chapitre 2).

Par exemple :

$w_L = 26 \%$, $w_P = 23 \%$, on trouve $I_p = 3\%$. D'après la fig. 3.8, le sol se trouve sous la ligne A, donc sa classification est SLP (SLM) c'est sable limoneux peu plastique.

4. Conclusion

Dans ce chapitre deux essais ont été décrits, le tamisage à sec après lavage et la sédimentométrie. La classification des sols LPC ne fait pas de distinction entre les tailles de particules pour les particules inférieures à 80 μm , alors que l'essai à l'aide de densimètre permet de donner notamment des informations concernant la distribution des particules du sol de taille inférieure à 80 μm . L'utilisation des résultats de l'essai de sédimentométrie nécessite, en plus, la mesure des deux caractéristiques intrinsèques du sol qui sont la limite de liquidité et la limite de plasticité.

Après avoir obtenus les résultats de l'analyse granulométrique (par tamisage et sédimentation) et les limites d'Atterberg (quand c'est nécessaire), une classification du sol pourra se faire en utilisant le tableau de la classification LPC/USCS.

Chapitre IV. Mesure des caractéristiques de compactage (Essai Proctor)

1. Introduction

Les ingénieurs en géotechnique compactent les sols pour améliorer certaines de leurs propriétés. Les propriétés telles que la résistance au cisaillement, la compressibilité et la conductivité hydraulique vont varier en fonction des méthodes utilisées pour compacter le sol. Le sol compacté est largement utilisé dans l'ingénierie géotechnique, tels que les barrages en terre, les couches de chaussée, les remblais, etc. Pour prédire la performance des sols compactés, et pour élaborer des critères de construction appropriés, il faut d'abord effectuer des essais de laboratoire avec des méthodes normalisées. Proctor (1933) a développé une procédure de test de compactage en laboratoire pour déterminer la teneur en eau qui permet d'atteindre le poids volumique sec maximum en fonction d'une énergie pour respecter les exigences du projet.

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

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

2. Principe de l'essai

L'essai se fait selon la norme NF P 94-093 : 1999 [18]. L'essai 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. D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec (ρ_{dmax}) qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau appelée teneur en eau optimale (w_{opt}). Ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé.

3. Equipements et matériaux

Pour réaliser cet essai, le matériel suivant est nécessaire (fig.4.1) :

- Une quantité suffisante du sol sec (doit être séchée dans l'étuve avant la réalisation de l'essai).
- Un socle de compactage.
- Un moule Proctor.

- Une dame dite « dame Proctor normal » est constituée d'un mouton cylindrique de 51 ± 1 mm de diamètre.
- Une règle à araser.
- Un pulvérisateur à eau.
- Une étuve.
- Une balance.



Figure 4.1 Moule et dame de l'essai Proctor normal.

4. Procédure de l'essai

L'essai de compactage Proctor est réalisé conformément aux étapes suivantes :

- i. Peser 3 kg du sol sec.
- ii. Humidifier le sol à une teneur en eau (w) connue.
- iii. Diviser la quantité du sol homogénéisé en trois parties égales.
- iv. Peser le moule vide sans la hausse, et mesurer sa hauteur et son diamètre.
- v. Solidariser : moule, embase et rehausse.
- vi. Introduire la 1^{ère} partie du matériau et compacter 25 coups : trois séquences de huit coups répartis, et le 25^{ième} au centre (fig.4.2).

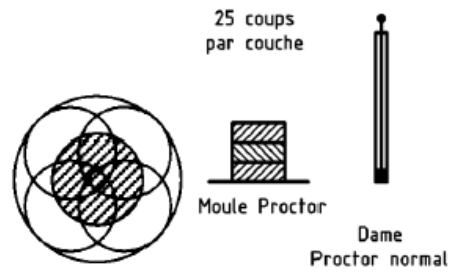


Figure 4.2 Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche dans un moule Proctor normal [18].

- vii. Refaire la même opération pour les trois couches.
- viii. Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, puis araser le matériau soigneusement (f.g.4.3).



Figure 4.3 Echantillon du sol à la fin de compactage [19].

- ix. Peser l'ensemble du moule avec le matériau.
- x. Prélever une masse de l'échantillon à la surface du moule, puis retirer l'embase de ce dernier afin de prendre une 2^{ème} masse, afin de mesurer les teneurs en eau correspondantes.
- xi. Rajouter 2 % de teneur en eau et bien mélanger avec le sol.
- xii. Recommencer l'opération de l'étape 5 à 10, plusieurs fois de suite avec des teneurs en eau croissantes afin de tracer une courbe de forme d'une cloche.

5. Expression des résultats

5.1 Calculs préparatoires

Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :

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

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

Avec :

ρ_h : est la masse volumique du sol humide.

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

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

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

5.2 Tracé du graphe

Afin de déterminer le poids volumique sec maximal et la teneur en optimale, on trace la courbe $\gamma_d = f(w_{op})$ (fig.4.4), puis on détermine ces deux paramètres à partir du graphe comme le montre la courbe Proctor ci-dessous (figure 4.3).

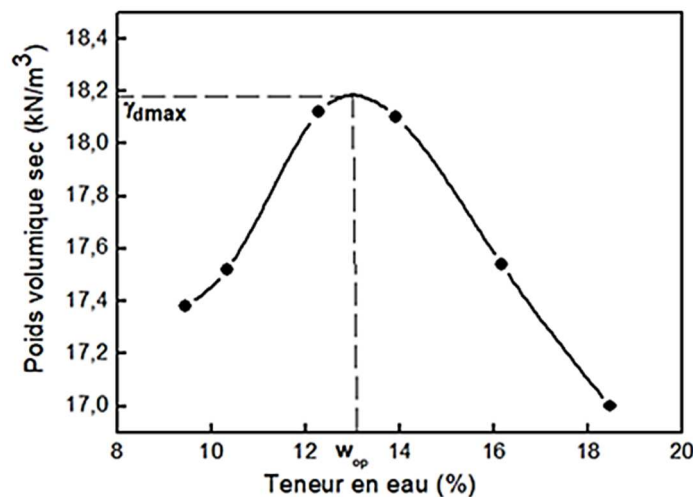


Figure.4.4. Courbe cde compactage essai Proctor normal ($\gamma_d = f(w)$).

Afin de réaliser un essai de compactage Proctor, normal ou modifié, au laboratoire, il faut se référer au tableau 4.1. Ce tableau donne le nombre de couches et le nombre de coups par couche pour les 4 types d'essai normalisés (Proctor normal, Proctor modifié, Essai de compactage avec moule CBR normal, Essai de compactage avec moule CBR modifié).

Tableau 4.1 Caractéristiques techniques du matériau utilisé pour un essai Proctor [20].

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

6. Exemple de calcul

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

Tableau 4.2 Les résultats obtenus lors de l'essai Proctor normal.

Masse d'eau ajoutée à chaque étape de compactage (%)	8	10	12	14	16
Masse totale humide (m ₁) (kg)	5,265	5,353	5,405	5,39	5,387
Masse du moule (m ₂) (kg)	3,313	3,313	3,313	3,313	3,313
Volume du moule (cm ³)	937,76	937,76	937,76	937,76	937,76

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

Tableau 4.3 Résultats de la mesure de la teneur en eau lors de l'essai de Proctor normal.

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

Le calcul suivant est effectué pour tous les points de l'essai de compactage réalisé au laboratoire (tableau 4.3) :

a. Calcul des paramètres de compactage

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

- i. Masse du sol humide (kg) = Masse totale humide - Masse du moule = $m_1 - m_2$
- ii. Volume du moule : $V = 937,76 \text{ cm}^3$.
- iii. La teneur en eau mesurée pendant l'essai est la moyenne des deux mesures réalisées pour les tares (H) et (B) : $w = 8,33 \%$.
 - La teneur en eau pour la tare (H) est calculée comme suit :

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

- iv. Masse du sol sec

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

Masse volumique sèche est donnée par la formule suivante :

$$\rho_d = \frac{\text{masse du sol sec } (m_s)}{\text{Volum total } (V)} = \frac{1,80}{937,76 \times 10^{-6}} = 1925,62 \text{ kg/m}^3$$

Tableau 4.4 Résultats de l'essai de compactage Proctor normal.

Masse d'eau ajoutée à chaque compactage (%)	8		10		12		14		16	
Masse totale humide (m_1) (kg)	5,265		5,353		5,405		5,39		5,387	
Masse du moule (m_2) (kg)	3,313		3,313		3,313		3,313		3,313	
Masse du sol humide (kg)	1,952		2,04		2,092		2,077		2,074	
Volume du moule (cm^3)	937,76		937,76		937,76		937,76		937,76	
Masse humide m_T (N)	19,52		20,4		20,92		20,77		20,74	
Densité humide (G_h)	2,08		2,18		2,23		2,21		2,21	
N° de la tare	1(H)	2(B)	4(H)	5(B)	20,39	8(B)	10(H)	11(B)	13(H)	14(B)
Masse total humide (g)	29,85	31,01	32,72	39,14	43,92	45,21	44,17	46,25	40,21	43,25
Masse totale sèche (g)	28,41	29,43	30,7	36,48	40,33	41,58	39,77	41,72	35,68	38,49
Masse de la tare (g)	10,98	10,62	10,9	10,86	10,84	10,76	10,93	10,54	7,75	7,68
Masse de l'eau (g)	1,44	1,58	2,02	2,66	3,59	3,63	4,4	4,53	4,53	4,76
Masse du sol sec (g)	17,43	18,81	19,8	25,62	29,49	30,82	28,84	31,18	27,93	30,81
Teneur en eau (%)	8,26	8,40	10,20	10,38	12,17	11,78	15,26	14,53	16,22	15,45
Teneur en eau moyennes (%)	8,33		10,29		11,97		14,9		15,8	
Masse du sol sec (Kg)	1,80		1,85		1,87		1,81		1,79	
Masse volumique sèche (ρ_d (kg/m^3))	1925,62		1972,78		1994,11		1930,13		1908,80	
Densité sèche (G_d)	1,92		1,97		1,99		1,93		1,90	

b. Tracé du graphe

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

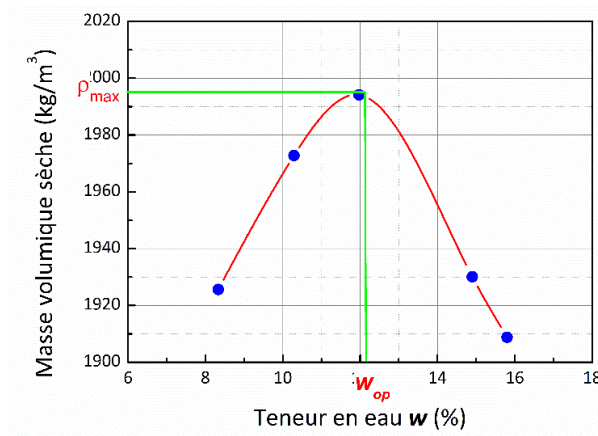


Figure 4.5 Courbe de compactage de Proctor normal.

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

$$\rho_{d\ max} = 1995,15 \text{ kg/m}^3 \text{ et } w_{op} = 12,5 \text{ \%}.$$

7. Conclusion

L'essai de compactage permet de déterminer pour une énergie donnée, la masse volumique sèche maximum et la teneur en eau optimale. Ces deux paramètres pourraient être utilisés sur le chantier. Cela dit, il n'est pas possible de reproduire au laboratoire le compactage tel qu'il est pratiqué par les engins de chantier ; en effet, les modes de chargement diffèrent. Malgré cela, les valeurs de ces deux paramètres mesurés au laboratoire permettent de réussir le compactage in-situ et d'assurer une bonne vérification du travail réalisé.

Le diagramme obtenu de l'essai de compactage, représentant la densité sèche en fonction de la teneur en eau, est essentiel pour la conduite d'un chantier de compactage. Dès que la possibilité d'établir une correspondance entre le processus utilisé au laboratoire et le nombre de passes des différents engins est assurée et les exigences respectées, les objectifs seront atteints [20].

De plus, il est utile de rappeler que, dans la plupart des spécifications relatives aux travaux de terrassement, il est exigé d'obtenir un poids volumique sec minimal sur chantier de 95 % du poids volumique sec maximum obtenu en laboratoire [2].

Chapitre V. Mesure de la densité in-situ par le densitomètre à membrane

1. Introduction

Lorsqu'un sol est utilisé pour construire des plates-formes d'autoroute et des couches de chaussée, des centres de stockage des déchets, des barrages en terre, des remblais, etc., le sol doit être compacté conformément aux exigences du projet. Les spécifications pour le sol compacté sont généralement données en termes de fourchette acceptable de teneur en eau (w) et/ou de poids volumique sec (γ_d) sur la base des résultats des essais de compactage au laboratoire. Pour confirmer que le sol est compacté conformément aux spécifications du projet, le poids volumique sec (et la teneur en eau) du sol compacté in-situ est mesuré pour valider sa valeur conformément aux exigences du cahier de charge.

Parmi les nombreuses méthodes et appareils existants, le densitomètre à membrane permet de mesurer (γ_d) et (w) in situ.

2. Principe de l'essai

Cet essai a pour objet de déterminer la masse volumique d'un matériau en place. Il est destiné particulièrement aux matériaux dont $D_{\max} < 50$ mm.

L'essai se fait conformément à la norme NF P 94-061-2 : 1996 [21]. Il consiste à creuser une cavité dans un sol, à recueillir et peser la totalité du matériau extrait, puis mesurer le volume de la cavité à l'aide de l'eau contenu dans un densitomètre à membrane.

3. Equipements et matériaux

Le matériel suivant est nécessaire pour effectuer cet essai :

- Un densitomètre à membrane, dont la description [21] est illustrée par la fig.5.1.
- Quatre piquets d'ancrage (valets).
- Matériel pour le creusement (pelle, marteau, etc.).
- Matériel de prélèvement (sacs en plastique, bacs, etc.).
- Balance.
- Etuve.
- Récipients pour mesurer la teneur en eau.

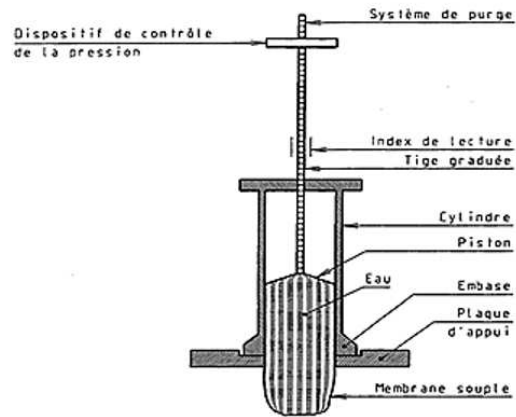


Figure 5.1 Densitomètre à membrane.

4. Procédure de l'essai

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

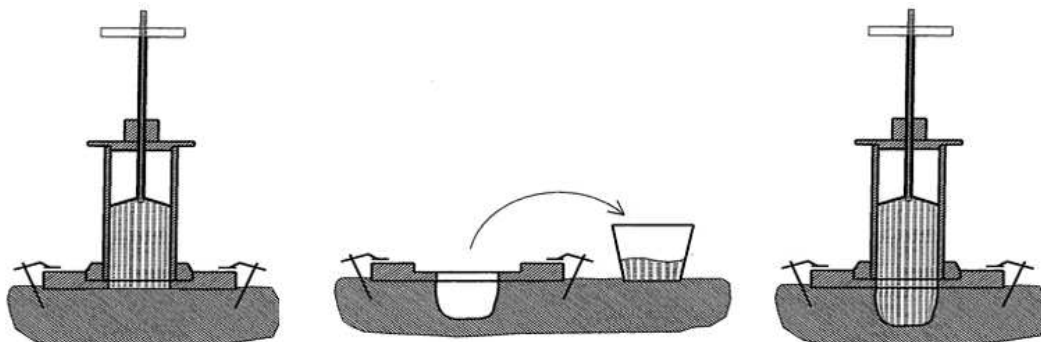


Figure 5.2 Procédure de l'essai de densitomètre à membrane [21].

5. Expression des résultats

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

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

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

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

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

$$\rho_d = \frac{\rho_h}{w+1} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (5.3)$$

6. Exemple de calcul

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

Volume initial V_0	260 cm ³
Masse du matériau humide extrait du trou (m_h).	1157,58 g
Volume final V_f après prélèvement du matériau	850 cm ³
Masse du matériau sec (m_s).	1062 g

i. Calculer la densité sèche du sol mesuré in situ.

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

a. Calcul de la teneur en eau

$$w = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 = \frac{1157,58 - 1062}{1062} \times 100$$

$$w = 9 \%$$

b. Calcul de la masse volumique humide (ρ_h)

$$\rho_h = \frac{m_h}{V_f - V_i} = \frac{1157,58}{850 - 260} = 1,962 \text{ g/cm}^3 = 1962 \text{ kg/m}^3$$

c. Calcul de la masse volumique sèche (ρ_d)

$$\rho_d = \frac{\rho_h}{w+1} = \frac{1962}{0,09+1} = 1800 \text{ kg/m}^3$$

d. Calcul de la densité sèche (G_d)

$$G_d = \frac{\rho_d}{\rho_w} = \frac{1800}{1000} = 1,80.$$

7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la détermination de la masse volumique des sols in situ en utilisant l'essai au densitomètre à membrane. C'est une méthode simple et rapide à réaliser sur des grands terrains avec moins d'étapes de calcul.

Par ailleurs pendant l'expérimentation, une attention particulière est indispensable pour éviter l'endommagement de la membrane de l'appareil de mesure, surtout en ce qui concerne les matériaux grenus ou graveleux. En plus, lors de l'essai c'est parfois difficile d'obtenir une forme de trou qui permettrait à la membrane de bien épouser sa forme.

Conclusion

Beaucoup pensent qu'en raison du caractère hétérogène du sol, de ses variations capricieuses, des difficultés et des erreurs d'échantillonnage, des valeurs imparfaites et limitées de la théorie et d'autres sources d'erreur inévitables, il n'est pas du tout nécessaire de respecter le soin et la prudence habituels dans les activités de laboratoire en général. Cela n'est pas vrai, car ces prémisses conduisent exactement à la conclusion inverse : puisque le sol est hétérogène, et que l'échantillonnage comporte des erreurs et des fautes, etc. il faut effectuer avec rigueur la partie des essais qui peut être contrôlée et qui dépend de l'humain. C'est la seule façon de réduire le nombre de sources d'erreur et d'augmenter la fiabilité de l'essai effectué. Seul le strict respect des spécifications généralement admises en matière des essais peut rendre les résultats répétables et reproductibles, et les expériences menées par différents laboratoires comparables.

Pour obtenir des résultats expérimentaux fiables et précis, l'équipement doit être correctement entretenu. L'étalonnage de tous les équipements de mesure doit être effectué conformément aux exigences techniques et normatives. Il est toujours nécessaire de veiller à ce que tout l'équipement soit propre avant et après utilisation, et de l'entretenir pour le maintenir en état de fonctionnement.

Le laboratoire est un organe qui procède plusieurs activités telles que les essais, la vérification du matériel utilisé, la vérification de l'erreur et le calcul des incertitudes. Si on veut assurer la fiabilité, la justesse et la précision de la mesure, les exigences de la norme ISO 17025 : 2017 [22] doivent être respectées. Cette norme, qui aboutit à l'accréditation des laboratoires d'essais, exige de respecter les spécifications suivantes :

1. Equipements

L'équipement utilisé dans les laboratoires de mesure doit répondre aux exigences normalisés, tels que :

- Le laboratoire doit avoir accès aux équipements nécessaires pour une exécution convenable aux normes des activités et pouvant avoir une influence sur les résultats. Ces équipements sont les instruments de mesures, logiciels, étalons de mesure, réactifs et produits consommables.
- Le laboratoire doit disposer d'une procédure pour la manutention, le transport, le stockage, l'utilisation et la maintenance planifiée des équipements afin d'en assurer le bon fonctionnement et de prévenir toute contamination ou détérioration. Comme l'équipement doit être conforme aux exigences spécifiées avant d'être mis ou remis en service.
- Les équipements de mesure doivent être étalonnés lorsque l'exactitude de mesure ou l'incertitude de mesure affectent la validité des résultats rapportés. Ainsi que l'étalonnage de l'équipement est exigé afin d'établir la traçabilité métrologique des résultats rapportés. Pour cela, les types d'équipement ayant un effet sur la validité des résultats rapportés peuvent comprendre :

- ceux utilisés pour un mesurage direct du mesurande, par exemple l'utilisation d'une balance pour effectuer une mesure de masse ;
 - ceux utilisés pour apporter des corrections à la valeur mesurée, par exemple les mesures de la température ;
 - ceux utilisés pour obtenir un résultat de mesure calculé à partir de plusieurs grandeurs.
- Tout équipement exigeant un étalonnage ou dont la période de validité a été fixée doit être étiqueté, codé ou autrement identifié afin de permettre à l'expérimentateur d'identifier aisément le statut de l'étalonnage ou la période de validité.
 - Un équipement doit être mis hors service s'il est sujet à une surcharge ou à une mauvaise manutention, qui donne des résultats douteux ou qui s'est révélé défectueux ou hors du cadre des exigences spécifiées. Dans ce cas, il doit être isolé afin d'empêcher son utilisation ou être clairement étiqueté ou marqué comme étant hors service jusqu'à ce que son aptitude à fonctionner correctement ait pu être vérifiée. Le laboratoire doit examiner l'effet de la défaillance ou de l'écart par rapport aux exigences spécifiées.
 - Les contrôles intermédiaires pour maintenir la confiance dans la performance de l'équipement, doivent être effectués selon une procédure.
 - Les valeurs de référence ou des facteurs de correction obtenues de l'étalonnage doivent être mise à jour et mise en œuvre de manière à satisfaire aux exigences spécifiées. Aussi que des dispositions sont prises contre des réglages non prévus d'équipement invalidant les résultats.
 - Des enregistrements doivent être conservés pour les équipements pouvant avoir une influence sur les activités de laboratoire. Les enregistrements doivent inclure ce qui suit, si applicable :
 - l'identité de l'équipement.
 - le nom du fabricant, l'identification de type et le numéro de série ou autre identification unique.
 - des preuves des vérifications de la conformité de l'équipement aux exigences spécifiées.
 - l'indication de son emplacement actuel.
 - les dates des étalonnages, les résultats des étalonnages, ajustages, critères d'acceptation et la date prévue du prochain étalonnage ou l'intervalle d'étalonnage.
 - le plan de maintenance et les informations à jour sur l'entretien effectué, si pertinents pour la performance de l'équipement.
 - des informations détaillées sur tous les éventuels dommages, dysfonctionnements, modifications ou réparations apportées à l'équipement.

2. Évaluation de l'incertitude de mesure

- Le laboratoire doit identifier et évaluer les incertitudes de mesure en utilisant des méthodes d'analyse appropriées.
- Un laboratoire doit évaluer l'incertitude de mesure de tous les étalonnages, y compris de ses propres équipements. Quand il procède à des essais, l'incertitude de mesure doit être évaluée. Lorsque la méthode d'essai ne permet pas une évaluation rigoureuse de l'incertitude de mesure, il faut faire une estimation sur la base d'une connaissance scientifique des principes théoriques ou d'une expérience pratique de la performance de la méthode.

3. Assurer la validité des résultats

- Le laboratoire doit disposer d'une procédure pour surveiller la validité des résultats. Les données résultantes doivent être enregistrées de sorte que les tendances soient détectables et, lorsque cela est faisable, des techniques statistiques doivent être appliquées à l'examen des résultats. Cette surveillance doit être planifiée et revue. Parmi les pratiques utilisées pour vérifier la validité des résultats :
 - utilisation d'autres instruments qui ont été étalonnés pour fournir des résultats traçables.
 - contrôle de fonctionnement des instruments de mesure et des équipements d'essai.
 - utilisation d'étalons de vérification.
 - contrôles intermédiaires des instruments de mesure.
 - essais ou étalonnages répétés à l'aide de méthodes identiques ou différentes.
 - nouvel essai ou nouvel étalonnage d'objets conservés.
- Le laboratoire doit surveiller sa performance en la comparant avec les résultats d'autres laboratoires, si cela existe et est approprié. Cela se fait par la participation soit aux essais d'aptitude ou à des comparaisons interlaboratoires autres que des essais d'aptitude.
- Les données provenant des activités de surveillance doivent être analysées et utilisées pour maîtriser et, le cas échéant, pour améliorer les activités de laboratoire. Si les résultats de l'analyse de données des activités de surveillance ne satisfont pas aux critères prédéfinis, une action appropriée doit être prise pour éviter que des résultats incorrects soient fournis.

Toutes ces exigences nous obligent à former nos étudiants aux essais avec des méthodologies appropriées et des modes opératoires rigoureux et précis en vue d'aboutir à des résultats valides et d'assurer la fiabilité et la justesse de la mesure pour garantir la pérennité des ouvrages que les ingénieurs et les architectes construisent. C'est ce à quoi ce modeste document vous convie.

Bibliographie

- [1] Norme AFNOR : NF P 94-054, Détermination de la masse volumique des particules solides des sols, 1991.
- [2] Braja M. Das., Soil mechanics laboratory manual. Sixth edition, Oxford University Press, 2002.
- [3] Norme AFNOR : NF P 94-053, Détermination de la masse volumique des sols fins : Méthode de l'immersion dans l'eau, 1991.
- [4] Norme AFNOR : NF P 94-050, Détermination de la teneur en eau pondérale des sols : Méthode par étuvage, 1995.
- [5] Michael E. Kalinski., Soil mechanics lab manual. 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc. 2011.
- [6] Árpád Kézdi., Handbook of soil mechanics: Soil testing. Volume 2, Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.
- [7] Norme AFNOR : NF P 94-051, Détermination des limites d'Atterberg : Limite de liquidité à la coupelle – limite de plasticité au rouleau. 1993.
- [8] <https://www.youtube.com/watch?v=Ei6ABD2fI0A>
- [9] Muni Budhu., Soil mechanics and foundations, 3rd ed, John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [10] Norme AFNOR : NF P 94-068, Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche. 1998.
- [11] https://www.youtube.com/watch?v=mZEF_Lep18Q
- [12] Jean-Pierre Magnan., Description, identification et classification des sols. Doc. C 208, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction. 1997.
- [13] LCPC & SETRA., guide technique : Réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicule I, Principes généraux. Deuxième Edition 2000.
- [14] http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-MecaSols/chap2/granularite.html
- [15] Norme AFNOR : NF P 94-056, Analyse granulométrique : Méthode par tamisage à sec après lavage. 1996.
- [16] Norme AFNOR : NF P 94-057, Analyse granulométrique des sols : Méthode par sédimentation. 1992.
- [17] Norme AFNOR : ISO/DIS 14688-2, Géotechnique - Dénomination, description et classification des sols - Partie 2 : Quantification et principe de classification. 2001.

[18] Norme AFNOR : NF P 94-093, Détermination des références de compactage d'un matériau : Essai Proctor normal. 1999.

[19] <https://www.youtube.com/watch?v=aTkFjH52R4M>

[20] P. Lareal., Mécanique des sols : Essais de laboratoire. Service Géotechnique, I.N.S.A de Lyon, 1975.

[21] Norme AFNOR NF P 94-061-2 : Détermination de la masse volumique d'un matériau en place : Méthode au densitomètre à membrane.1996.

[22] Norme Internationale : ISO/IEC 17025 : Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais. 2017.

Annexes

Compte rendu n°1
Analyse granulométrique par tamisage à sec

1) Compléter le tableau suivant

Ouverture des tamis (mm)	Masse des tamis vides (g)	Masse des refus partiels + tamis (g)	Masse des refus partiels Ri(g)	Masse des refus cumulés Rn(g)	Pourcentage des refus cumulés (%) (Rn/Ps) x 100	Pourcentage des tamis cumulés (%) 100 - (Rn/Ps) x100
10						
5						
2						
1						
0,4						
0,2						
0,08						
Fond						

2) Tracer la courbe granulométrique, le pourcentage du tamisat cumulé en fonction du diamètre.

3) Déterminer d_{10} , d_{30} et d_{60} à partir de la courbe granulométrique où d_x est le diamètre correspond à X % de tamisats cumulés.

.....

4) Calculer les coefficients de courbure et d'uniformité (Cc et Cu)

$Cc = (d_{30})^2 / (d_{10} \times d_{60})$; $Cu = d_{60}/d_{10}$

.....

5) Classifier le sol selon la classification USCS/LPC (voir tableau de classification).

.....

6) Analyser et interpréter les résultats.

.....

Compte rendu n°2

Analyse granulométrique par sédimentation

1) Compléter les tableaux suivants

Temps (s)	Température (°C)	Lecture témoin	Lecture A	ρ_w (kg/m ³)	P_s (kg/m ³)	Ct	Cm	Cd	Vs (cm ³)	m (kg)	ρ_t (kg/m ³)	Pourcentage d'éléments (%)	α	β	Viscosité (Pa.s)
20															
30															
60															
120															
300															
1200															
1800															

Temps (s)	Ho (cm)	H1 (cm)	h1 (cm)	Vd (cm ³)	A (cm ²)	H (cm)	Hc (cm)	Ht (cm)	D (μm)	D (mm)
20										
30										
60										
120										
300										
1200										
1800										

2) Tracer la courbe granulométrique, le pourcentage du tamisat (équivalent) cumulé en fonction du diamètre.

3) Classifier le sol selon la classification USCS/LCPC (voir tableau de classification).

.....

.....

.....

4) Analyser et interpréter les résultats.

.....

.....

.....

.....

.....

Compte rendu n°3

Détermination de la masse volumique des particules solides des sols

1) Compléter le tableau suivant

N° de l'échantillon	Masse de l'échantillon (m)	Masse du pycnomètre vide et de son bouchon (m_1)	Masse de l'échantillon + pycnomètre (m_2)	Masse de l'échantillon + pycnomètre + eau (m_3)	Masse d'eau + pycnomètre (m_4)
1					
2					

2) Calculer la densité des grains solides pour les deux essais.

N° de l'échantillon	Masse volumique ρ_s (kg/m^3)	Densité des grains solides G_s
1		
2		

3) Analyser et interpréter les résultats.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Compte rendu n°4

Mesure de la masse volumique par pesée hydrostatique

1) Compléter le tableau suivant

N° de l'échantillon	Masse de l'échantillon (m)	Masse de l'échantillon paraffiné (m _p)	Masse hydrostatique de l'échantillon paraffiné (m'p)
1			
2			

2) Déterminer la masse volumique des deux échantillons, en complétant le tableau ci-dessous.

N° de l'échantillon	Volume (m ³)	Masse volumique ρ (kg/m ³)
1		
2		

3) Analyser et interpréter les résultats.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Compte rendu N°5
Essai au bleu de méthylène

1) Compléter le tableau suivant

N° de l'échantillon	Masse de l'échantillon (m)	Valeur de V (cm ³)	Valeur de B
1			
2			

2) Calculer la valeur de VBS.

N° de l'échantillon	Valeur de VBS
1	
2	

3) Calculer la surface spécifique

.....

.....

.....

.....

4) Analyser et interpréter les résultats.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Compte rendu n°6

Détermination des limites d'Atterberg

Limite de liquidité à la coupelle – limite de plasticité au rouleau

1) Compléter les tableaux suivants

a- Limite de liquidité

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
NOMBRE DE COUPS					
N° DE LA TARE					
Masse totale humide (g)					
Masse totale sèche (g)					
Masse de la tare (g)					
Masse de l'eau (g)					
Masse du sol sec (g)					
Teneurs en eau (%) $\frac{\text{Masse de l'eau (g)}}{\text{Masse du sol sec (g)}} \times 100$					
Nombre de coups 25					
Teneur en eau de N = 25					

b- Limite de plasticité

	Essai 1	Essai 2	Essai 3
N° DE LA TARE			
Masse totale humide (g)			
Masse totale sèche (g)			
Masse de la tare (g)			
Masse de l'eau (g)			
Masse du sol sec (g)			
Teneurs en eau (%) $\frac{\text{Masse de l'eau (g)}}{\text{Masse du sol sec (g)}} \times 100$			
Limite de plasticité moyenne			

- 2) Tracer la droite de la limite de liquidité.
- 3) Classifier le sol selon la classification USCS/LPC (abaque de Casagrande)
- 4) Analyser et interpréter les résultats.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Compte rendu n°7
Essai Proctor normal

Détermination des caractéristiques de compactage d'un matériau

1) Compléter les tableaux suivants

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5
Teneur en eau imposée (initiale) %					
Masse du moule vide (kg)					
Volume du moule (m ³)					
Masse totale humide (kg)					
Masse du sol humide (kg)					
Masse volumique humide (kg/m ³)					
Poids volumique humide γ_h (kN/m ³)					

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4		Essai 5	
N° DE LA TARE										
Masse totale humide (g)										
Masse totale sèche (g)										
Masse de la tare (g)										
Masse de l'eau (g)										
Masse du sol sec (g)										
Teneurs en eau moyenne (mesurée) (w %)										
Poids volumique sec γ_d (kN/m ³)										

2) Tracer le graphe $\gamma_d = f(w)$.

3) Déterminer la teneur en eau à l'optimum (w_{opt}) et la densité sèche maximale (γ_{dmax}).

.....
.....

4) Analyser et interpréter les résultats.

.....
.....
.....
.....
.....
.....

