

Année Universitaire : 2017-2018



Licence Sciences et Techniques : Géoresources et Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Licence Sciences et Techniques

Importance de la Géotechnique et Contrôle de Qualité des Matériaux dans l'acte de construire

Présenté par :

EL GAROUANI Manal

EL BOUZAKRI EL IDRISSE Hanane

Encadré par :

Pr. LAHRACH Abderrahim, FST-Fès

Pr. EL BOUMASHOULI Sidi Mohamed, NBR-Fès

Soutenu Le 6 Juin 2018, devant le jury composé de :

Pr. LAHRACH Abderrahim

FST-Fès

Pr. BEN ABDELHADI Mohammed

FST-Fès

Pr. CHAOUNI Abdel-Ali

FST-Fès

Pr. BENAABIDATE Lahcen

FST-Fès

Mr. EL BOUMASHOULI Sidi Mohamed

NBR-Fès

Stage effectué au Laboratoire NBR, Fès



Remerciement

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer nos remerciements pour toutes les personnes qui ont contribué à réaliser ce projet de fin d'étude et qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

*Nous remercions Mr. **EL Boumashouli Sidi Mohamed** Directeur de Laboratoire NBR pour nous avoir donné l'opportunité d'effectuer notre stage dans son laboratoire et de sa collaboration pour l'accomplissement de ce modeste travail.*

*Nos plus profonds remerciements et toutes nos reconnaissances vont à notre encadrant Mr. **Lahrach Abderrahim** d'avoir assuré l'encadrement de ce travail. Sa disponibilité, son expérience, son savoir scientifique et ses qualités professionnelles ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail.*

*Mes remerciements vont également à Mr. **Ben Abdelhadi Mohammed**, Mr. **Benaabidate Lahcen** et Mr. **Chaouni Abdel-Ali**, d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

Nous présentons également, nos sincères remerciements à tous les techniciens et les personnels de Laboratoire NBR qui nous ont aidé à se familiariser avec le matériel et de réaliser tous les essais en particulier Mme Badaoui Ouidiane, Mr. El Fadili Oussama et Mr. EL Khalioui Mohamed.

Enfin, un merci bien chaleureux à tous nos professeurs de département Géo-ressources et Environnement qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.

Résumé

Dans la pratique actuelle de l'acte de construire, il est indispensable de recourir à la géotechnique lors de l'étude, la construction, la maintenance et la réparation de tout type d'aménagement et d'ouvrage. L'objectif de ce travail est de mettre en évidence l'importance de l'étude géotechnique dans la construction des ouvrages. La mission de laboratoire géotechnique joue un rôle déterminant au niveau de toutes les étapes de la réalisation d'un projet. Le présent travail a été réalisé en trois étapes : la première étape consiste à rappeler les notions fondamentales de la géotechnique, ces domaines d'application et les différentes étapes d'une étude géotechnique. La deuxième étape présente les différents essais que nous avons effectués au niveau de laboratoire géotechnique NBR-Fès à savoir : les essais d'identification du sol, les essais rhéologiques, les essais Proctor et les essais de compressibilité. La dernière étape concerne les essais réalisés au site d'ouvrage. L'étude géotechnique lors d'un projet d'aménagement permet d'assurer la pérennité des futurs ouvrages par l'apport d'information sur la nature des formations géologiques constituant le sous-sol du site prévu pour la réalisation de cet aménagement. Cette prise en compte de l'état du sous-sol permet d'adapter le projet au site envisagé, de définir le système de fondation de l'ouvrage avec le meilleur rapport sécurité/coût.

Mots clés : Etude géotechnique, laboratoire BTP, ouvrage d'art, acte de construire.

Sommaire

Introduction Générale	5
Chapitre 1 : Rôle de laboratoire BTP dans les études géotechniques	6
I. Introduction	6
II. La géotechnique	6
III. Les domaines d'applications de la géotechnique	6
IV. Laboratoire géotechnique NBR	7
V. Etude géotechnique d'un sol	7
Chapitre 2 : Mission de contrôle de qualité des matériaux	8
I. Préparation de l'échantillon pour l'essai	8
1.1. Prélèvement	8
1.2. Préparation	8
II. Essais au laboratoire	8
2.1. Essais sur les sols.....	8
2.1.1. Essais d'identification du sol	8
1. Essai 1 : La teneur en eau	8
2. Essai 2 : Analyse granulométrique	9
3. Essai 3 : Equivalent du sable	11
4. Essai 4 : Limites d'Atterberg	13
5. Essai 5 : Los Angeles	16
2.1.2. Proctor	19
2.1.3. Essai rhéologique : Œdométrie	22
2.1.4. Essais Mécanique : Essai de cisaillement rectiligne.....	24
2.2. Essais sur les Bétons et produits manufacturés.....	27
2.2.1. Essai de compression simple	27
1. Résistance du béton	27
2. Essai d'affaissement : cône d'Abrams	28
3. Résistance des briques	29
Chapitre 3 : Essais géotechniques in situ	30
1. Sondages carottés	30
2. Pénétromètre dynamique	30
3. Essai pressiométrique	31
4. Densitomètre à membrane	31
Conclusion Générale	32
Références Bibliographiques	33

Liste des figures

- Figure 1 : Série des tamis AFNOR
 Figure 2 : Courbe d'analyse granulométrique
 Figure 3 : L'équipement de la détermination de l'équivalent de sable
 Figure 4 : Malaxage du matériau
 Figure 5: - Le Rasage du matériau, - Pénétrromètre
 Figure 6 : Les rouleaux fissurés
 Figure 7 : Courbe de la limite de liquidité
 Figure 8 : Machine Los Angeles
 Figure 9 : Tamisage de l'échantillon
 Figure 10: les boulets métalliques et l'échantillon
 Figure 11 : Le refus de l'échantillon après l'essai
 Figure 12 : La différence entre le Proctor Normal et Proctor Modifié
 Figure 13 : Moule CBR / Moule Proctor
 Figure 14 : Disque d'espacement CBR /Disque d'espacement Proctor
 Figure 15 : Moule Proctor
 Figure 16 : Les étapes de l'essai Proctor
 Figure 17 : Courbe de l'essai Proctor
 Figure 18 : La cellule œdométrique
 Figure 19 : Remplissage de l'éprouvette par le matériau
 Figure 20 : Courbe œdométrique d'un sol non gonflant
 Figure 21 : Appareille de cisaillement
 Figure 22 : Le déplacement de deux demi-boîtes
 Figure 23 : les courbes de cisaillement 1
 Figure 24 : Les courbes de cisaillement 2
 Figure 25 : Compression des éprouvettes de béton durci
 Figure 26 : Rectification et compression des briques
 Figure 27 : La sondeuse et les carottes
 Figure 28 : Essai de densitomètre
 Figure 29 : Essai d'affaissement

Liste des tableaux

- Tableau 1 : Résultats d'essai d'analyse granulométrique
 Tableau 2 : Résultats des limites d'Atterberg1
 Tableau 3 : Résultats des limites d'Atterberg 2
 Tableau 4 : Classification du sol selon l'indice de plasticité.
 Tableau 5 : Le nombre des boulets en fonction des classes granulaires
 Tableau 6 : Classification du sol selon le coefficient de LOS ANGELES
 Tableau 7 : les résultats de l'essai de Proctor Modifié
 Tableau 8 : Caractéristique de l'éprouvette
 Tableau 9 : Résultats de l'essai œdométrique
 Tableau 10 : Caractéristiques des sondages
 Tableau 11 : Les différents types de béton.

Introduction générale

1. Acte de construire

Construire un nouvel ouvrage ne se limite pas à une action technique et utilitaire. C'est une démarche dont les incidences sont importantes pour l'évolution d'un territoire, ce qui renvoie à des enjeux essentiels. Elle consiste à valider l'intention de faire : évaluation des besoins, choix du site, analyse urbaine.

Les différentes phases de la réalisation d'un projet de construction sont :

- Faisabilité du projet architectural et autorisation
- Conception détaillée du bâtiment
- Planification de la construction
- Sélection des entreprises de la construction
- Les travaux de chantier
- Livraison du bâtiment au maître d'ouvrage

Les missions présentées ci-dessus représentent le cas général, elles peuvent néanmoins différer légèrement selon les caractéristiques individuelles de chaque projet et l'implication du maître d'œuvre.

2. Intervenants dans l'acte de construire.

La construction d'un ouvrage est une opération complexe qui nécessite la collaboration de nombreux intervenants. Elle s'appuie sur un ensemble de dossiers comprenant des pièces écrites et des pièces dessinées ayant un caractère artistique, technique, financier et administratif. L'essentiel de l'organisation du jeu des acteurs repose sur le maître d'ouvrage – le maître d'œuvre – le Bureau d'études techniques – le Bureau de contrôle – l'Entrepreneur (SETRA, 2008 et Pumelle et al. 20017).

- **Maitre de l'ouvrage** : Personne physique ou morale pour le compte de qui les travaux ou les ouvrages sont exécutés. Elle établit ses besoins de construction, acquérir un terrain et, réaliser les opérations d'investissement nécessaires.
- **Maitre d'œuvre** : Personne physique ou morale qui, pour sa compétence, est chargée par le maître de l'ouvrage de diriger l'exécution du marché et de proposer la réception ainsi que le règlement des travaux.
- **Bureaux d'études techniques** : Organisme indépendant ou service interne d'une entreprise, chargé d'étudier sur le plan technique le projet de maître d'œuvre, afin de garantir la résistance mécanique et la stabilité des ouvrages ainsi que le bon fonctionnement des équipements techniques.
- **Bureaux de contrôle** : Organisme choisi et rémunéré par le maître d'ouvrage qui contrôle le côté technique du projet pour assurer la sécurité des biens et des personnes.
- **Entrepreneur** : Personne physique ou morale qui a la charge de réaliser les travaux ou les ouvrages aux conditions définies dans les pièces du marché.

Le présent rapport est structuré en trois chapitres suivis d'une conclusion générale :

- Rôle de laboratoire dans l'étude géotechnique
- Mission de contrôle de qualité des matériaux
- Essais géotechniques in situ

Chapitre 1 : Rôle de laboratoire BTP dans les études géotechniques

I. Introduction

Dans la pratique actuelle de l'acte de construire, il est indispensable de recourir à la géotechnique lors de l'étude, la construction, la maintenance et la réparation de tout type d'aménagement et d'ouvrage (par exemple : habitat, route, voie ferrée, canal, barrage, etc.) (Zerhouni, 2011). L'absence de données précises sur les propriétés physiques des terrains, et la négligence des travaux préliminaires de recherches (sondages, prélèvements, etc.), met face les constructeurs à plusieurs difficultés lors des constructions civiles ou d'ouvrages d'art ce qui nécessite l'appel d'une étude géotechnique (Lerau, 2006 et Raini, 2017). La géotechnique est un élément essentiel pour tous les travaux de construction d'ouvrages. Elle joue un rôle important pour la pérennité de l'infrastructure de ces ouvrages. La géotechnique a pour objet principalement d'étudier le sous-sol, le plus souvent en vue de construire un ouvrage.

II. La géotechnique

La géotechnique est l'ensemble des activités liées aux applications de la mécanique des sols, de la mécanique des roches et de la géologie de l'ingénieur. La géotechnique s'appuie principalement sur 2 sciences (Martin, 2005) :

- La géologie qui retrace l'histoire de la terre, précise la nature de la structure des matériaux et leurs évolutions dans le temps.
- La mécanique des sols et des roches qui modélise leurs comportements en tant que déformabilité et résistance des matériaux.

III. Domaines d'application de la géotechnique

Les champs d'application de la géotechnique sont très vastes, on peut citer les applications suivantes :

- Les fondations des bâtiments, des ouvrages d'art, des ensembles industriels,
- Les ouvrages de soutènement,
- Les tunnels et travaux souterrains dans les sols,
- Les barrages et digues en terre,
- La stabilité des pentes naturelles et des talus et les travaux de stabilisation,
- Les ouvrages portuaires et maritimes (fondations de quais, comportement des brise-lames).
- Les terrassements des routes, autoroutes, voies ferrées,
- L'amélioration et le renforcement des sols,
- La protection de l'environnement.

IV- Le laboratoire Géotechnique NBR

Le laboratoire NBR est le premier laboratoire privé accrédité au Maroc de bâtiments et travaux publics qui est depuis 1994 intervient dans une dimension pluridisciplinaire de prestations d'ingénieries de haute qualité essentiellement dans le contrôle et la conception d'ouvrages en interaction avec le sol et les matériaux de construction. Ce laboratoire ayant pour objet l'étude systématique des propriétés physiques et mécaniques des sols et leur classification, apporte une contribution nouvelle à la solution des problèmes fondamentaux relatifs aux fondations et aux massifs terreux : tassement probable d'une fondation, débit des écoulements souterrains, stabilité des volumes terreux, poussée des terres, glissements, etc.

V. Étude géotechnique d'un sol

L'étude géotechnique est une opération dont dépend en grande partie la qualité de l'ouvrage projeté. Sa démarche générale consiste d'abord à caractériser le sol afin de pouvoir proposer des solutions pratiques à la réalisation de l'ouvrage (Slaoui et Raini, 2015). Son but est de fournir aux différents intervenants d'un projet des renseignements sur la nature et les propriétés des sols et de formuler des recommandations d'ordre géotechnique qui leur permettra de concevoir et de réaliser l'ouvrage projeté. L'étude géotechnique d'un ouvrage s'exécute en plusieurs étapes enchainées (SUTRA, 2012) :

- Mission G1 : Etude géotechnique préalable

Réalisée en amont d'une étude d'un avant-projet sommaire, elle permet de définir une première l'identification des risques géologiques d'un site à travers une enquête documentaire.

- Mission G2 : Etude géotechnique de conception

Cette mission est composée de deux phases :

- Phase Avant-Projet : Réalisée au stade de l'avant-projet, elle permet une première approche des quantités.
- Phase Projet : Réalisée au stade projet, elle permet une approche des quantités / délais / coûts d'exécution de ces ouvrages.

- Mission G3 : Etude et suivi géotechnique d'exécution

Elle est confiée à l'entrepreneur. Elle consiste à étudier et à suivre les méthodes et les conditions d'exécution d'un ouvrage géotechnique.

- Mission G4 : Supervision géotechnique d'exécution

Elle permet de vérifier la conformité aux objectifs du projet, de l'étude et du suivi géotechniques d'exécution. Elle est normalement à la charge du Maître d'Ouvrage.

- Mission G5 : Diagnostic géotechnique

Cette mission consiste dans le cadre d'une mission ponctuelle à étudier un ou plusieurs éléments géotechniques dans le cadre d'un diagnostic, mais sans aucune implication dans d'autres éléments géotechniques.

Chapitre 2 : Mission de contrôle de qualité des matériaux

I. Préparation de l'échantillon pour essai

1.1. Prélèvement

Le prélèvement des échantillons in-situ et leur livraison sont effectués soit par les agents de laboratoire soit par le client. Les échantillons sont conservés dans des sacs en plastique pour la préservation de leurs teneurs en eau (Fahd, 2015).

1.2. Préparation

La préparation s'effectue de deux manières différentes :

- Par Quartage : Elle est utilisée lorsqu'il s'agit d'une quantité importante de matériaux. On étale le matériau sur une surface lisse, puis on divise le tas étalé en 4 parties égales et on retient les 2 quarts opposés. Si la quantité est importante on fait une autre série de quartage.
- A l'aide de l'échantillonneur : Cet appareil sert à séparer en parties égales une quantité de matériau.

II. Essai au laboratoire

2.1. Essais sur sols

2.1.1. Essai d'identification du sol

Les essais d'identification permettent en principe de classer les sols rencontrés au cours d'une campagne de reconnaissance géotechnique en familles pour lesquelles les propriétés mécaniques sont voisines (Atlan, 1978).

a. Essai 1 : La teneur en eau

But : déterminer la teneur en eau contenue dans un échantillon

Principe : l'échantillon contient des grains solides, de l'eau et de l'air. L'essai consiste à déterminer la teneur en eau de l'échantillon en suivant plusieurs étapes.

Appareillage : L'échantillonneur ; Les tares ; L'étuve à 105°C et La balance

Mode opératoire :

- ✓ On utilise l'échantillonneur pour homogénéiser la prise d'essai.
- ✓ On pèse la masse de l'échantillon humide puis on le sèche dans l'étuve à 105°C et on pèse à nouveau la masse de l'échantillon sec.
- ✓ On effectue les calculs suivants :

$$P (\text{tare}) = 140.25 \text{ g}$$

$$P (\text{totale humide}) = 295.35 \text{ g}$$

$$P (\text{totale sec}) = 283 \text{ g}$$

$$P (\text{l'eau}) = P (\text{totale humide}) - P (\text{totale sec}) = 12,32 \text{ g}$$

$$P (\text{sol sec}) = P (\text{totale sec}) - P (\text{tare}) = 142,2 \text{ g}$$

- ✓ La teneur en eau :

$$W(\%) = 100 * (P (\text{l'eau}) / P (\text{sol sec}))$$

$$W(\%) = 8.64 \%$$

b. Essai 2 : Analyse granulométrique : Selon la norme NF P 94-056

But : c'est un essai d'identification qui consiste à étudier la granulométrie du sol c'est-à-dire la distribution des grains suivant leurs dimensions en déterminant par pesée l'importance relative des classes de grains de dimensions bien définies (AFNOR, 1996).

Principe : L'essai consiste à séparer par une série de tamis une masse connue de matériau en plusieurs classes de taille décroissantes du haut vers le bas, et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis (Figure 1).

Appareillages : L'étuve ; des tamis de différents diamètres (10 - 0,08 mm) ; Balance ; Vibrateur ; Des tares.

Mode opératoire :

- ✓ On sèche le matériau dans l'étuve à une température maximale de 105°C pour les sols insensible à la chaleur et à 50°C pour ceux sensible à la chaleur jusqu'à l'état sèche (Poids constant après plusieurs pesée).
- ✓ On emboîte les tamis les uns sur les autres par ordre croissant des ouvertures du bas vers les hauts de la colonne.
- ✓ On dispose un couvercle en haut de la colonne pour éviter toute perte de matériau au cours de tamisage.
- ✓ On effectue le tamisage soit manuellement soit par vibrateur qui facilite la tâche.
- ✓ On pèse le tamisât cumulé dans chaque tamis.



Figure 1 : Série des tamis AFNOR

✓ Expression de résultats :

- Pourcentage massique de refus : C'est le rapport entre la masse (R) des refus cumulés du matériau sec sur le tamis d'ouverture (d) à la masse totale initiale de l'échantillon de sol sec (ms)

$$(100 - p) = 100 * R / ms$$

p : le pourcentage massique de tamisât.

- Pourcentage massique de passant :

$$P = 100 (1 - R/ms)$$

✓ Présentation de résultats :

Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage sont représentés par le tableau et la figure ci-après :

Tableau 1 : Résultats d'essai d'analyse granulométrique (Poids d'échantillon : 800g)

Modules	Tamis (mm)	Poids du refus parti	Poids du cumul	%Du refus cumul	%Du passant au diamètre conside
50	50 80				100
49	49 63				100
48	48 50				100
47	47 40				100
46	46 31				100
45	45 25				100
44	44 20				100
43	43 16				100
42	42 12,5				100
41	41 10				100
40	40 8,00				100
39	39 6,3				100
38	38 5,00				100
37	37 4,00				100
36	36 3,15				100
35	35 2,5				100
34	34 2,00				100
33	33 1,6	0,05	0,05	0,01	99,99
32	32 1,25	0,05	0,1	0,01	99,99
31	31 1,00		0,1	0,01	99,91
30	30 0,80		0,1	0,01	99,83
29	29 0,63	1,9	2	0,25	99,75
28	28 0,50		2	0,25	98,50
27	27 0,40		2	0,25	97,25
26	26 0,32	29,95	31,95	3,99	96,01
25	25 0,25		31,95	3,99	94,65
24	24 0,20		31,95	3,99	93,29
23	23 0,16	32,6	64,55	8,07	91,93
22	22 0,13		64,55	8,07	91,48
21	21 0,10		64,55	8,07	91,03
20	20 0,08	10,8	75,35	9,42	90,58

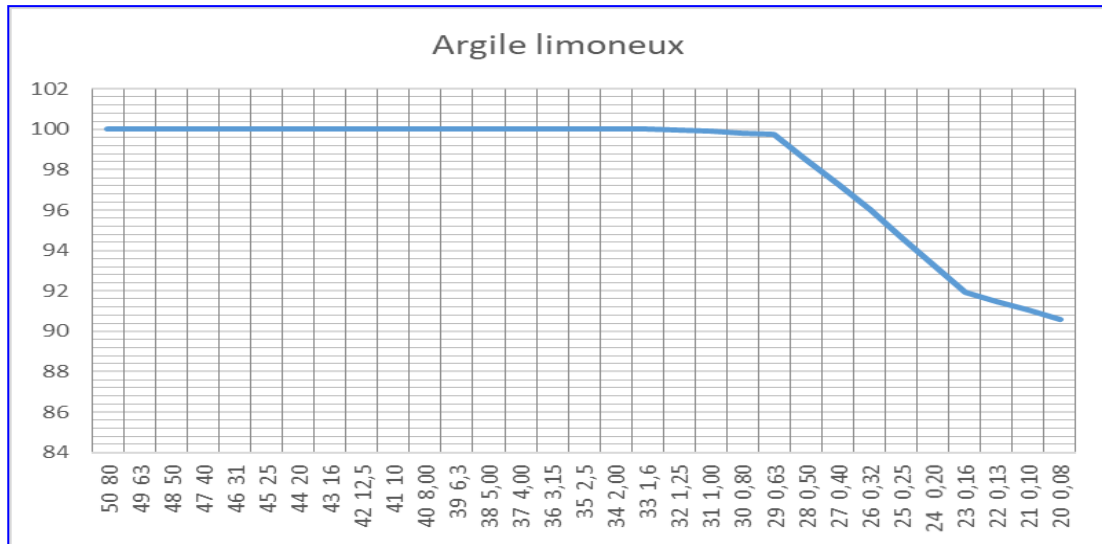


Figure 2 : Courbe d'analyse granulométrique

Conclusion : Selon la classification géotechnique du sol on peut déduire que l'échantillon sur lequel on a saisi l'essai appartient à la class des sols fins : 90.58% du passant au tamis 0.08mm.

c. Essai 3 : Equivalent du sable selon la norme : NF EN 933-8

But : Evaluer la propreté de sable entrant dans la composition de bétons.

Principe : Il consiste à séparer les particules fines contenues dans les éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalence de sable qui quantifie sa propreté.

Appareillage : 2 éprouvettes en plastique graduées unies d'un bouchon en caoutchouc ; Entonnoir ; Tube laveur ; Règle graduée ; Machine agitatrice.

Réactifs utilisés :

- a. Solution concentrée constituée des éléments suivants :
 - Chlorure de calcium anhydre CaCl₂.
 - Glycérine à 99% de glycérol.
 - Formaldéhyde en solution, 40% en volume, de qualité de réactif pour laboratoire.
 - Eau distillée ou déminéralisée.
- b. Solution lavante :
 - Préparé en diluant (125±1) ml de solution concentrée à (5±0,01) l avec de l'eau distillée

NB: La solution lavante ne doit pas être utilisée plus de 28 jours après sa préparation

Préparation de prise d'essai :

L'essai doit être réalisé sur la fraction 0/5mm à une teneur en humidité inférieure à 2%(pour éviter la perte d'éléments fins) et à une température de 23°C.

La prise d'essai doit être égale à :

$$\begin{aligned}
 m(g) &= 120 \cdot (100 + W) / 100 \\
 &= 120 \cdot (100 + 0.048) / 100 \\
 m(g) &= 125.8 \text{ g}
 \end{aligned}$$

Mode opératoire :

- ✓ Remplissage des éprouvettes gradués : On remplit les 2 éprouvettes par la solution lavante jusqu'au trait 100 ml et on verse l'échantillon à l'aide de l'entonnoir. On tape le fond de chaque éprouvette par la paume de la main afin de dégager les bulles d'air et on les laisse reposer pendant 10 min.
- ✓ Agitation des éprouvettes : On ferme les éprouvettes par un bouchon de caoutchouc puis on fixe l'éprouvette sur l'agitateur et on la laisse agiter pendant 30s.
- ✓ Lavage : On lave et on remplit l'éprouvette jusqu'au 2ème trait repère à l'aide de tube plongeur.
- ✓ Mesurage : On laisse les 2 éprouvettes décanter pendant 20 min puis on mesure la hauteur h_1 (sable propre et éléments fins) et h_2' (sable propre seulement). Après on descend soigneusement le piston dans le cylindre jusqu'à ce que l'embase repose sur le sédiment et en bloque le manchon sur la tige du piston. On mesure h_2 (sable propre).
- ✓ Calculs et expression des résultats :

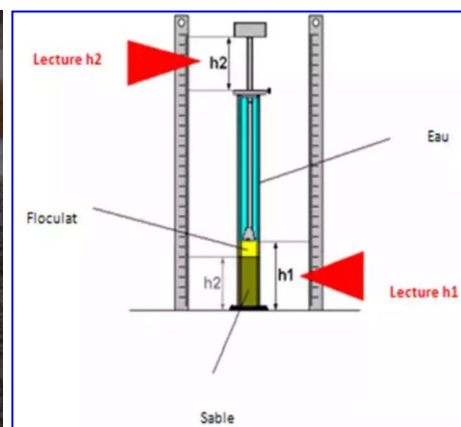


Figure 3 : L'équipement de la détermination de l'équivalent de sable

Expression des résultats :

$h_1 = 127\text{mm}$; $h_2' = 95\text{mm}$; $h_2 = 69\text{mm}$

ES visuelle = $(h_2' / h_1) * 100 = (95/127)*100 = 74.80\%$

ES sous piston = $(h_2 / h_1)*100 = (69/126)*100 = 54.76\%$

Conclusion :

$65 < \text{ESV} = 74.80\% < 75 \rightarrow$ Sable légèrement argileux : Admissible pour bétons courants.

d. Essai 4 : Limites d'Atterberg selon la norme : NF P 94-052-1

But : L'essai permet de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement en particulier sous l'action des variations de teneur en eau (AFNOR, 1993).

Appareillage : L'étuve ; Une balance ; Une coupelle et une spatule ; Couteau à bord rectiligne ; Tamis $400\mu\text{m}$; Pénétrömètre.

Mode opératoire :**Préparation du sol :**

- Après échantillonnage du sol et homogénéisation par brassage une masse (m) est mise à imbiber pendant 24h.
- Une fois imbibé le matériel est tamisé par voie humide au tamis de $400\mu\text{m}$, l'eau de lavage et le tamisât sont recueillis dans un bac.
- Après une durée de décantation d'au moins de 12h, l'eau clair du bac est siphonnée sans entrainer de particules solides. Le reste de l'eau est évaporée à une température ne dépassant pas 50°C .

Essai de pénétration :

- **Limite de liquidité W_L** : C'est la teneur en eau, exprimée en % du poids de la matière sèche, pour laquelle le corps étudié passe de l'état fluide à l'état plastique.
 - On malaxe la totalité du tamisât précédemment préparé afin d'obtenir une patte homogène.



Figure 4 : Malaxage du matériau

- On remplit le récipient avec une partie de cette pâte et on l'arase avec un couteau afin d'obtenir une surface lisse et plane.
- On met en place le récipient et on laisse le cône s'enfoncer dans le sol pendant 5s puis on la bloque. On note la nouvelle valeur.
- On effectue un prélèvement de sol dans le récipient, dans la zone de pénétration du cône. Puis on le place dans une coupelle de masse connue.
- On met le prélèvement dans l'étuve pour la dessiccation et on mesure sa teneur en eau.
- Cet essai doit être effectué au moins 4 fois sur la même pâte, avec une teneur en eau différente. Les valeurs de l'enfoncement doivent être situées dans l'intervalle 12mm à 25mm.



Figures 5 : Le Rasage du matériau – Pénétromètre -Dessiccation du matériau.

- **Limite de plasticité W_p** : C'est la teneur en eau à l'instant où le corps passe de l'état plastique à l'état solide.
 - On forme une boulette à partir de la pâte préparée précédemment.
 - On roule la boulette sur une plaque lisse, à la main de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre.
 - La limite de plasticité est obtenue lorsque simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint $3\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$ et sa longueur $10 \pm 0.5\text{cm}$.



Figure 6 : Les rouleaux fissurés.

- Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau est réintégré à la boulette. La pâte est malaxée tout en étant séchée légèrement, éventuellement sous un flux d'air chaud à une température inférieure à 50°C.
- On prélève, une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau et on la place dans une capsule de masse connue, On la pèse immédiatement et On l'introduit dans étuve, afin de déterminer sa teneur en eau.
- Présentation de résultats :

Tableau 2 : Résultats des limites d'Atterberg 1

	limite de liquidité				Limite de plasticité
	24,4	19,7	17	13,2	
Enfoncement en mm	24,4	19,7	17	13,2	
Poids total humide	63,65	68,15	65,6	72,95	31,15
Poids total sec	52	55,45	54,15	59,5	26,45
Poids de la tare	36,95	37,55	36,9	37,85	13,3
Poids de l'eau	11,65	12,7	11,45	13,45	4,7
poids du sol sec	15,05	17,9	17,25	21,65	13,15
Teneur en eau	0,77	0,71	0,66	0,62	0,36

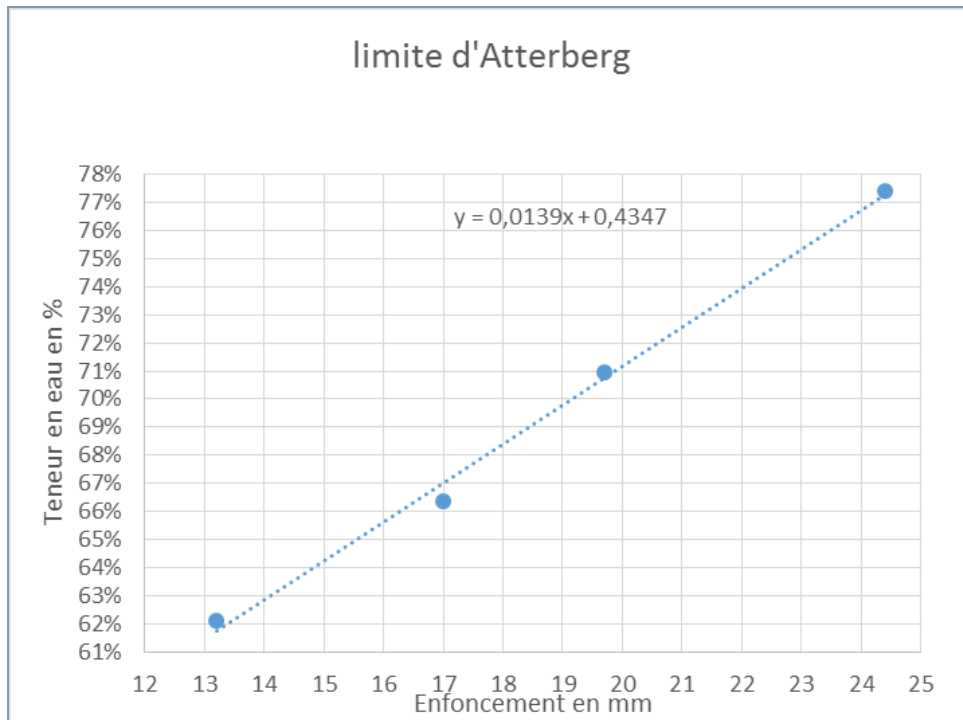


Figure 7 : Courbe de la limite de liquidité

Tableau 3 : Résultats des limites d'Atterberg 2.

Limite de liquidité	Limite de plasticité	Indice de plasticité
67,1	35,7	31,4

Conclusion :

Le résultat de l'essai des limites d'Atterberg est $15 < I_p = 31,4 < 40$ ce qui montre le sol étudié est d'une plasticité élevée selon la classification adoptée (Tableau 4).

Tableau 4 : Classification du sol selon l'indice de plasticité

Indice de Plasticité	Degré de Plasticité
$0 < I_p < 5$	Sol non plastique
$5 < I_p < 10$	Sol de plasticité faible
$10 < I_p < 20$	Sol de plasticité moyenne
$20 < I_p < 40$	Sol de plasticité élevée
$I_p > 40$	Sol de plasticité très élevée

e. Essai 5 : Los Angeles selon la norme : NM 10.1.138

But d'essai : Cet essai a pour but de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats.

Principe : L'essai consiste à mesurer la masse (m') d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations, à une vitesse entre 30Tr/min-33Tr/min (SNIMA, 1994).

Appareillage : Tamis ; Machine Los Angeles ; Tares ; Balance ; Etuve.



Figure 8 : Machine Los Angeles.

Mode opératoire :

- On tamise l'échantillon à sec sur chacun des tamis, de la classe granulaire choisie en commençant par le tamis le plus grand, Puis on lave le matériau et on le sèche.



Figure 9 : Tamisage de l'échantillon

- La masse de l'échantillon pour l'essai sera de 5000g±5g.
- On introduit avec précaution 11 boulets correspondants à la classe granulaire 10-25, puis l'échantillon qui contient 60% de 10-16mm et 40% de 16-25mm dans la machine Los Angeles.



Figure 10 : Les boulets métalliques et l'échantillon.

Tableau 5 : Nombre des boulets en fonction du class granulaire

Classes granulaires d/D	Nombres de boulets	Masse de la charge	Nombres de rotations
4 / 6.3	7	3080	500
6.3 / 10	9	3960	500
10 / 14	11	4840	500
10 / 25 (avec 60% de 10/16)	11	4840	500
16 / 31.5 (avec 60% de 16/25)	12	5280	500
25 / 50 (avec 60% de 25/40)	12	5280	500

- Après que la machine effectue 500 rotations, on tamise le matériau sur le tamis de 1.6mm.
- On lave le refus au tamis de 1.6mm et on le sèche à l'étuve puis on le pèse.



Figure 11 : Le refus de l'échantillon après l'essai

➤ Expression des résultats :

Le coefficient Los Angeles :

$$m' = 4068 \text{ g}$$

$$LA = 18.64\%$$

$$LA = 100 \times \frac{5000 - m'}{5000}$$

➤ Conclusion :

Le résultat de l'essai Los Angeles (LA) est ($15 < LA = 18.64\% < 25$) ce qui montre la résistance du matériau étudié est bonne à moyenne selon la classification adoptée (Tableau 6).

Tableau 6 : classification du sol selon le coefficient de LOS ANGELES

Coefficient LOS ANGELES	Appréciation
<15	Très bon à bon
15 à 25	Bon à moyen
25 à 40	Moyen à faible
>40	Médiocre

2.1.2. Essai Proctor

On peut effectuer deux types d'essai (choix par rapport à l'énergie de Compactage) (JPE, 2004) :

L'essai Proctor Normal : le remplissage est fait en 3 couches.

L'essai Proctor Modifié : le remplissage est fait en 5 couches.

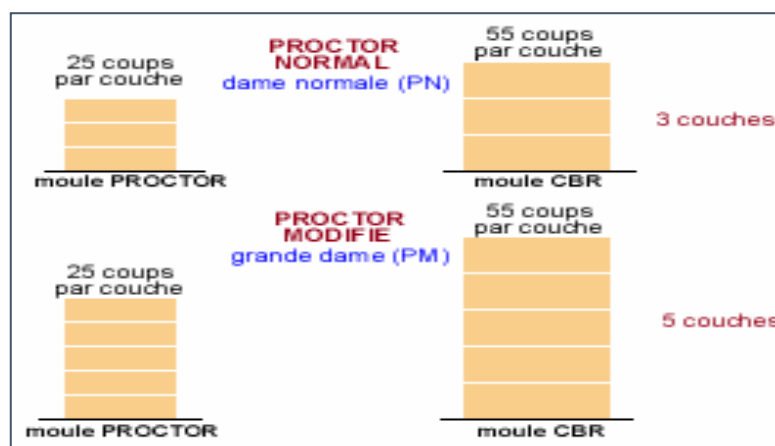


Figure 12 : La différence entre Proctor Normal et Proctor Modifié

On a deux types de moule :

- Moule Proctor : pour les matériaux fins de dimensions inférieure à 5mm.
- Moule CBR : Pour les matériaux de dimensions supérieure à 5 mm et inférieure à 20mm.

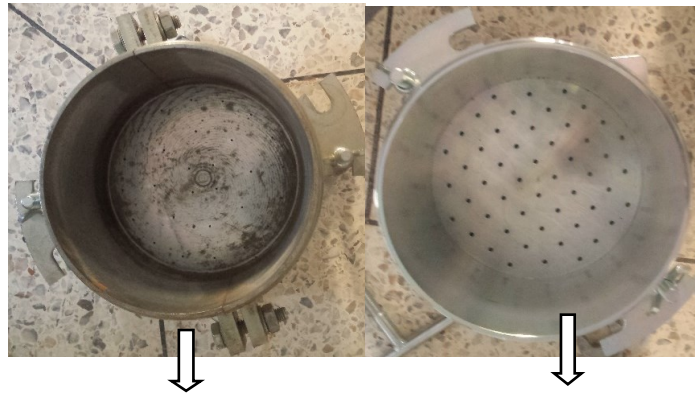


Figure13 : Moule CBR. / Moule Proctor.

Les 2 modules de moules se différent dans le disque d'espacement :



Figure 14 : Disque d'espacement CBR / Disque d'espacement Proctor

But : Préciser pour un sol donné et un compactage normalisé l'influence de la teneur en eau.

Principe : Le sol à étudié est compacté au moyen d'une dame, à différentes teneurs en eau W . On mesure chaque fois la densité sèche du matériau compacté et on trace la représentation graphique de la variation de densité en fonction de W .

Appareillage :

Un socle de compactage ; Moule Proctor ;
Dame de compactage ; Tamis 20 mm

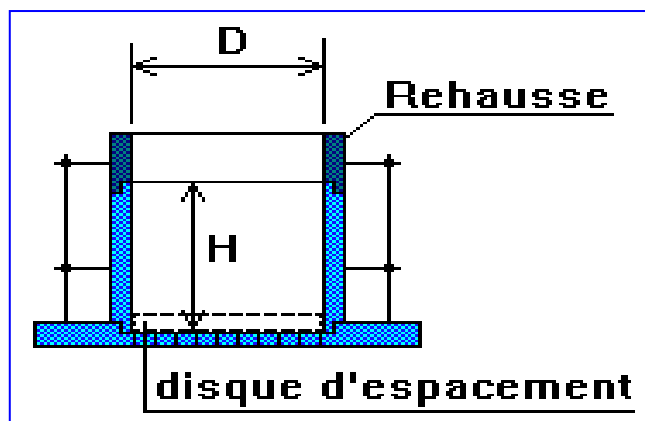


Figure 15 : Moule Proctor

Préparation de prise d'essai :

- On prélève un échantillon d'une masse suffisante pour l'essai, puis on le sèche à l'air ou dans l'étuve si c'est nécessaire.
- On passe le matériau dans un tamis de 20 mm et seule le tamisât et conservé pour exécution de l'essai.
- Le matériau est homogénéisé et divisé en 5 parts égales.

- On humidifie 4 parts de l'échantillon avec des pourcentages d'eau différents et on les conserve dans des sacs hermétiques durant un temps fonction de l'argilosité du matériau.

Mode opératoire :

Essai Proctor modifié :

- c. On prend 6 kg du matériau et on le divise en 5 parts égales
- d. On introduit une part dans le moule Proctor et on effectue le compactage de cette couche avec la dame en appliquant 56 coups avant d'introduire la 2ème couche. On continue de même façon jusqu'à atteindre les 5 couches.
- e. Après le compactage de la dernière couche on retire la rehausse et on arase soigneusement l'excédent.
- f. On pèse l'ensemble du moule avec le matériau et on calcule la densité



Figure 16: Les étapes de l'essai Proctor

- g. De même manière on va calculer la densité des autres échantillons humidifiés.
- h. Expression des résultats :

Tableau 7 : Les résultats de l'essai Proctor modifié

Poids total humide	1073,75	1489,3	1056,5	1279,2	1238
Poids total sec	946,6	1297,6	917,95	1093,8	1035,35
Poids de la tare	298,4	418,8	305,35	338,65	317,05
Poids de l'eau	127,15	191,7	138,55	185,4	202,65
Poids du sol sec	648,2	878,8	612,6	755,15	718,3
Teneur en eau	19,62	21,81	22,62	24,55	28,21
Chaque compactage	6%	9%	10%	12%	15%
Poids total humide	15560	15940	16050	16100	16000
Poids du moule	11738,5	11738,5	11738,5	11738,5	11738,5
Poids du sol humide	3821,5	4201,5	4311,5	4361,5	4261,5
Volume du moule	2103	2103	2103	2103	2103
Densité humide	1,82	2,00	2,05	2,07	2,03
densité seche	1,52	1,64	1,67	1,67	1,58

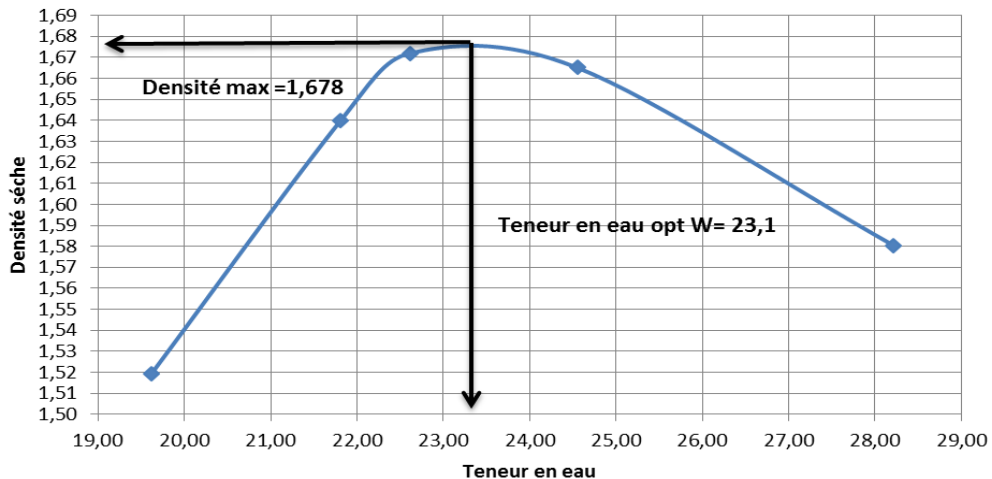


Figure 17 : Courbe cumulative de l'essai Proctor

2.1.3. Essai rhéologique : Œdométrie selon la norme : NM 13.1.003 (SNIMA, 1997)

But : étudier la consolidation, c'est-à-dire la variation de volume due à l'expulsion de l'eau d'échantillons de sols intacts ou remanié soumis à des charges verticales permanentes.

Principe : l'essai s'effectue sur une éprouvette de matériau placée dans l'œdomètre. Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical. La cellule œdométrique, étant drainée du haut en bas et maintenue saturée pendant l'essai.

Les charges sont appliquées successivement de manière croissante ou décroissante, et les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

Appareillage : L'œdomètre :

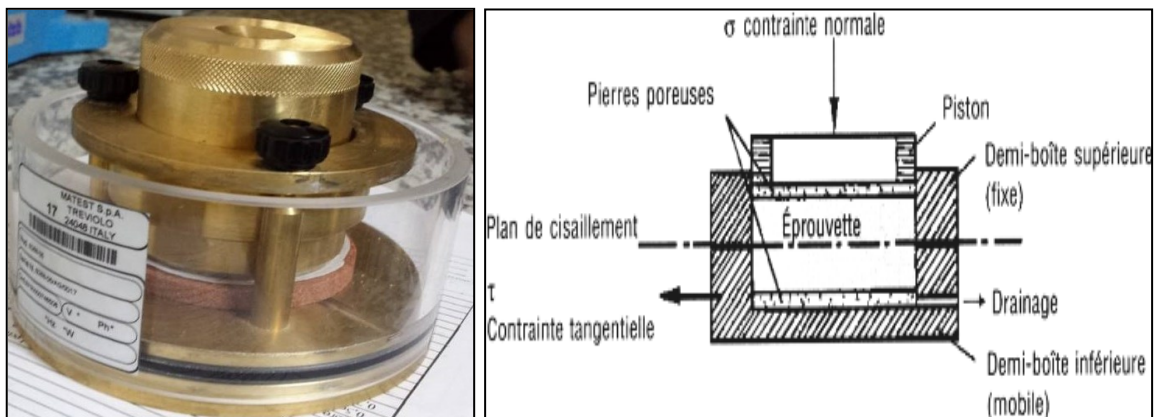


Figure 18 : la cellule Œdométrique.

Mode opératoire :

- **Préparation de l'éprouvette :** on remplit l'éprouvette par le matériau et on l'arase des deux faces.



Figure19 : Remplissage de l'éprouvette par le matériau

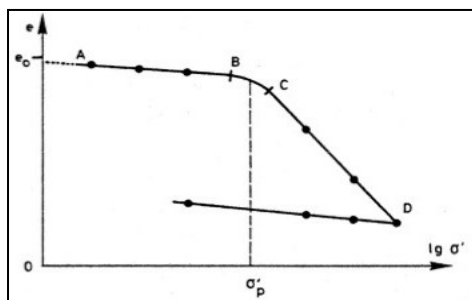
➤ **Déroulement de l'essai :**

On pèse l'éprouvette puis on l'introduit dans la cellule œdométrique entre les deux pierres poreuses qui sont protégés par un papier filtre. On augmente graduellement la charge. A chaque état de contrainte correspondra, après tassement, un nouveau volume apparent et une nouvelle teneur en eau de l'échantillon. Après la stabilisation finale de la compression, on décharge l'éprouvette en observant son gonflement.

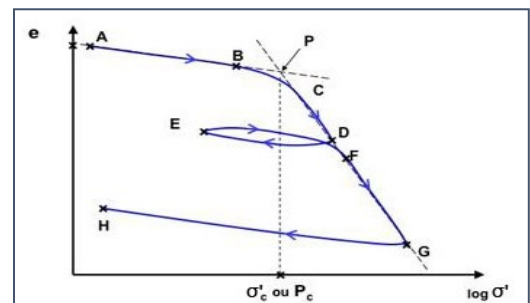
Une fois le déchargement est achevé, on retire l'éprouvette de la cellule et on l'a met à l'étuve afin de déterminer sa masse sèche.

➤ **Présentation des résultats :**

Les résultats de cet essai se donnent sous forme d'une courbe œdométrique. La loi de chargement à adopter pour l'essai est fonction du comportement de l'éprouvette en présence d'eau :



Cas d'un sol gonflant



Cas d'un sol non gonflant

Exemple :

Essai de compressibilité sur sols fins saturés avec chargement par paliers :

Tableau 8 : Caractéristiques de l'éprouvette

Caractéristiques de l'éprouvette	Avant essai	Après essai
Diamètre : D en mm	20	20
Hauteur : H en mm	63	63
Poids total humide (anneau + éprouvette)	192	
Poids de l'anneau	72.25	
Poids de la tare	51.95	58.3
Poids total humide	114.35	172.55
Poids total sec	62.4	147.7

Tableau 9 : Résultats de l'essai Œdométrique.

Date	Palier N°	ŒV en g	ŒV en Bars	Lecture comp. En (mm)	ΔH en (mm)	ΔHc	Vt	ec
libre	0		0,03	5,540	0,000	0,000	62,095	0,857
libre	1		0,03	5,470	-0,070	0,070	61,877	0,851
0,5 ŒVo	2	442	0,14	5,320	-0,220	0,240	61,347	0,835
0,756ŒVo	3	663	0,21	5,240	-0,300	0,328	61,073	0,827
ŒVo	4	884	0,28	5,190	-0,350	0,384	60,899	0,822
0,63 ŒVo	5	557	0,18	5,200	-0,340	0,370	60,942	0,823
Libre	6		0,03	5,270	-0,270	0,288	61,198	0,831
0,63 ŒVo	7	557	0,18	5,220	-0,320	0,350	61,005	0,825
ŒVo	8	884	0,28	5,170	-0,370	0,404	60,836	0,820
2 ŒVo	9	1768	0,57	5,050	-0,490	0,538	60,419	0,807
4 ŒVo	10	3537	1,14	4,850	-0,690	0,656	60,051	0,796
8 ŒVo	11	7074	2,27	4,650	-0,890	1,024	58,905	0,762
16 ŒVo	12	14147	4,54	4,250	-1,290	1,410	57,702	0,726
8 ŒVo	13	7074	2,62	4,290	-1,250	1,356	57,870	0,731
2 ŒVo	14	1768	0,43	4,430	-1,110	1,188	58,394	0,747
libre	15		0,03	4,750	-0,790	0,850	59,447	0,778

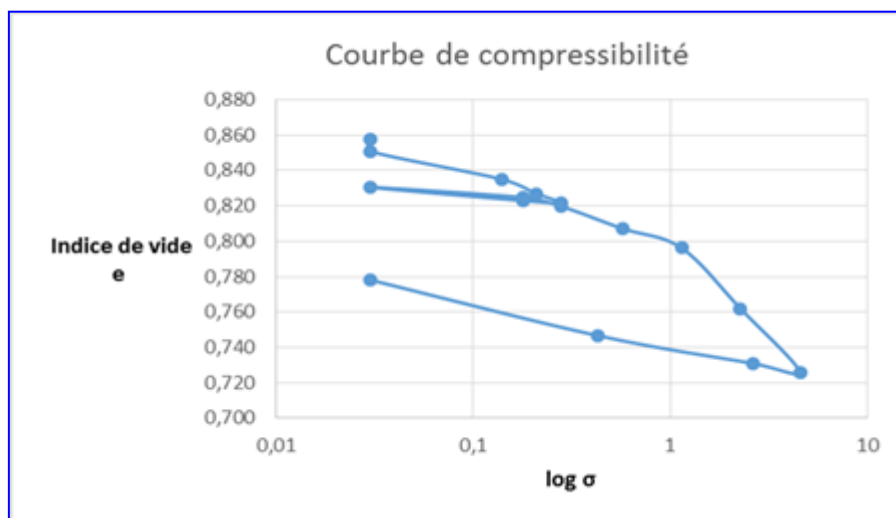


Figure 20 : Courbe Œdométrique d'un sol non gonflant.

2.1.4. Essai mécanique : Essai de Cisaillement rectiligne

But d'essai : La détermination de la courbe intrinsèque du sol permet de calculer la résistance au cisaillement sous une contrainte normale et de déduire les caractéristiques mécaniques (AFNOR., 1994) :

- Angle de frottement.
- Cohésion.

Principe : L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation de deux demi-plans constitue un plan de glissement correspond au plan de cisaillement de l'éprouvette.

Appareillage :



Figure 21 : Appareille de cisaillement.

Mode opératoire :

- Consolider l'éprouvette de section (s) dans une première phase en appliquant sur la face supérieure un effort vertical constant maintenu pendant tout l'essai. La consolidation permet de calculer la vitesse à laquelle doit être cisailé l'échantillon, celle-ci est achevée lorsque les lectures sur le comparateur exprimé en (mm) se stabilisent. La contrainte : $\sigma_n = N/s$
- Cisailier ensuite le long du plan de séparation des 2 demi-boîtes en leur imposant un déplacement relatif à vitesse constante.
- Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant et calculer la contrainte : $t = T/s$
- L'essai est réalisé sur au minimum 3 éprouvettes en augmentant à chaque fois la contrainte normale appliquée.

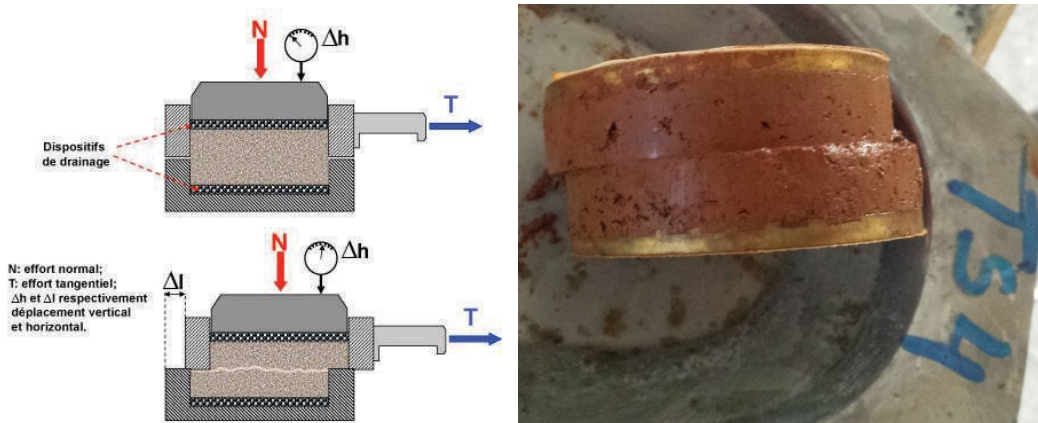


Figure 22 : Le déplacement de deux demi-boîtes

➤ Expression des résultats :

Exemple : Cas d'un sable limoneux

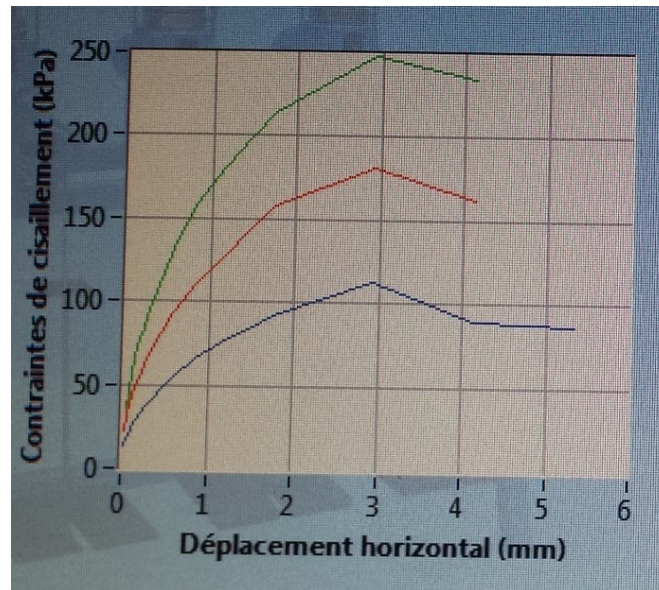


Figure 23 : Les courbes de cisaillement 1

Les 3 courbes représentent les contraintes de cisaillement en fonction de déplacement horizontal. Chaque courbe correspond à une contrainte due à une charge différente (1bar (3 Kg), 2bar (6 Kg), 3bar (9 Kg)).

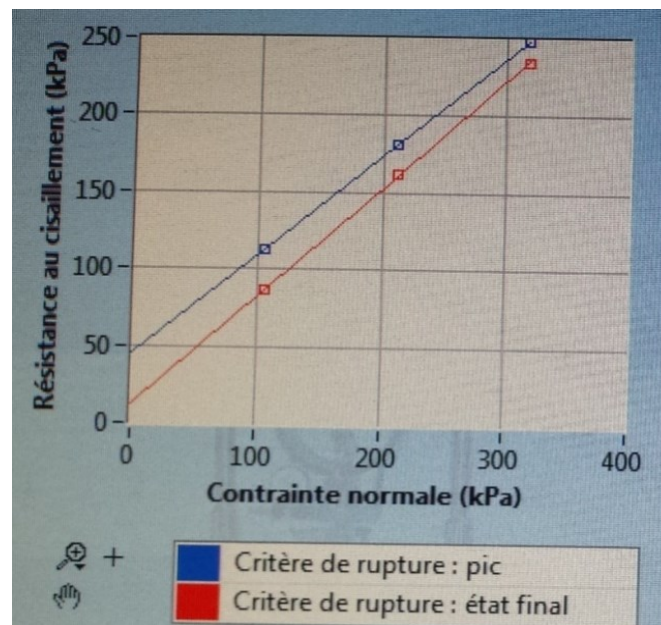


Figure 24 : Courbe de cisaillement 2

Les résultats de l'essai sont présentés sous forme d'une courbe par laquelle on détermine l'angle de frottement ϕ (la pente) et la cohésion C' (l'ordonnée à l'origine de la droite).

$$C' = 45.03 \text{ KPa}$$

$$\phi = 32.69^\circ$$

2.2. Essais sur les Bétons et produits manufacturés

2.2.1. Essai de compression simple

But de l'essai : Permet de tester et déterminer la résistance à la compression et à la traction.

On peut considérer cet essai tant qu'une étude qu'un contrôle.

- ✓ Etude faite par laboratoire sur la formulation du béton.
- ✓ C'est un essai de contrôle des bétons ramenés du chantier.

a. **Résistance du béton :**

Principe : L'essai consiste tout d'abord à déterminer la masse volumique des éprouvettes en béton, ensuite, les éprouvettes sont soumises à des charges pour déterminer leurs résistances à la compression (SNIMA, 2008).

Les éprouvettes doivent être cylindriques, obtenus dans des moules par carottage du béton durci.

Les extrémités des éprouvettes doivent être rectifiées par soufre.

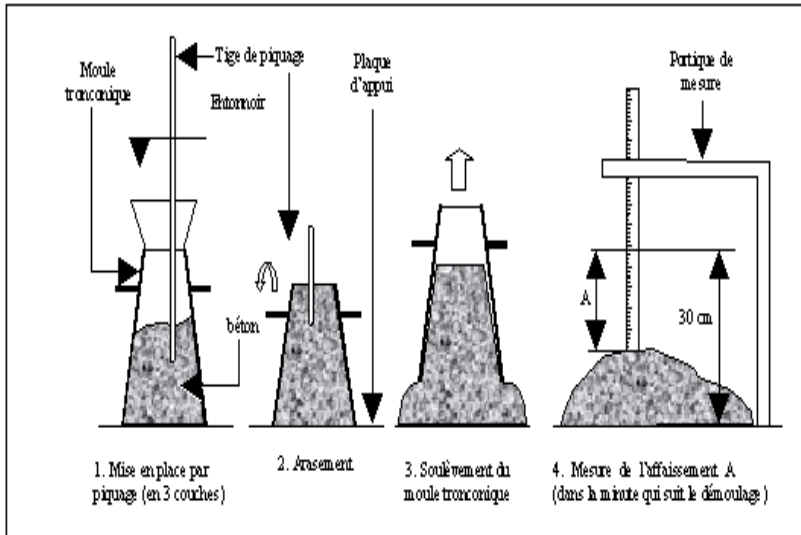


Figure 25 : Compression des éprouvettes de Béton durci

b. Essai d'affaissement : (le cône d'Abrams)

Le cône d'Abrams est un outil normalisé. Il détermine le taux d'affaissement du béton frais et donc sa consistance. La hauteur de l'affaissement du béton est mesurée en cm.

La mesure d'affaissement permet de vérifier si l'ouvrabilité du béton est conforme à celle souhaitée. Le dosage en eau du béton peut être ajusté selon le résultat de l'essai.



Figures 29: Essai d'affaissement.

➤ Les étapes :

- Le cône doit être légèrement huilé. Il est rempli de béton en trois couches.
- Chaque couche est piquée par 25 coups de façon répartie avec une tige de piquage.
- Le cône de béton est immédiatement démoulé. Le béton s'affaisse selon sa consistance.
- L'affaissement du béton est mesuré à l'aide du réglé sur portique.

Tableau 11 : Les différents types de béton

Affaissement	Type du béton	Classe
De 0 à 4cm	Ferme	S1
De 5 à 9cm	Plastique	S2
De 10 à 15cm	Très plastique	S3
Supérieur à 16cm	Fluide	S4

c. Résistance des briques selon la norme : NM 10.1.042

L'essai a pour but de déterminer la résistance des briques à l'écrasement. On rectifie les 2 surfaces des briques par le ciment, puis on effectue l'essai sur une presse.



Figure 26 : Rectification et compression des briques

✓ Expression des résultats :

La résistance d'écrasement : $R = F \cdot 100 / S$

F : Charge maximale supportée (KN)

S : Surface de la brique.

$$R = (30 \cdot 100) / 25000 = 12 \text{ bar}$$

Chapitre 3 : Essais Géotechniques in situ

Les essais géotechniques in situ permettent d'approfondir l'étude des sols et des roches avant toute construction en surface ou en profondeur (Parriaux, 2018).

1- Les sondages carottés

Un sondage carotté permet d'extraire du sous-sol sur de grande profondeur des échantillons de sols (intact) et ainsi de réaliser une coupe exacte de la géologie du terrain. Les échantillons de sols peuvent être ensuite analysés en laboratoire afin de les caractériser parfaitement et de déterminer précisément les niveaux de fondation.

Ces sondages consistent à exécuter un trou dans le sol à l'aide d'un tube en rotation muni à sa base d'un outil coupant « couronne » et à remonter ensuite avec précaution des échantillons « carottes » les moins remaniés possibles pour l'étude en laboratoire.

Les échantillons recueillis par le carottier prennent place dans une caisse à carottes (Fig. 24). Les échantillons intacts destinés aux essais en laboratoire seront enveloppés pour éviter une altération pendant le transport.



Figure 27 : La sondeuse et les carottes.

Tableau 10 : Caractéristiques des sondages

Numéro de sondage	VBH 01	VBH 02	VBH 03
Profondeur de sondage (m)	16,5	30	20
Diamètre des carottes (cm)	10.5	10.5	10.5

2. Le pénétromètre dynamique (NF P 94-115 / NF P 94-114)

Essai de pénétration dynamique permet de déterminer la résistance des sols et leur capacité à porter des ouvrages. L'essai est conçu à l'origine pour les sols pulvérulents ou à faible cohésion

dans lesquelles il est difficile de prélever des échantillons intacts. Le domaine préférentiel d'utilisation des pénétromètres dynamiques est la reconnaissance des terrains lors d'une reconnaissance préliminaire (AFNOR, 1999).

Cet essai consiste à enfoncer dans le sol par battage de manière continue un train de tiges muni en partie inférieure d'une pointe débordante et à noter le nombre de coups nécessaires pour faire pénétrer dans le sol la pointe d'une hauteur h de 20 cm.

3- Essai pressiomètre

C'est un essai de chargement de sol en place réalisé à l'aide d'une sonde cylindrique dilatable, laquelle est disposée au sein du terrain, dans un forage préalable. La dilatation de la sonde est obtenue par l'injection de l'eau dans la cellule centrale du pressiomètre. Une augmentation de pression est opérée de manière volontaire et localisée.

L'essai permet de déterminer la relation entre la pression p appliquée sur le sol et le déplacement de la paroi de la sonde. Le pressiomètre est largement utilisé pour le calcul des pressions de rupture des fondations superficielles ainsi que pour la détermination des tassements (Fethallah et Merzoufui, 2016).

4- Densitomètre à membrane

Cet essai permet de mesurer les masses ou poids volumiques apparents des sols (humide γ , ou sec γ_d) après tassement ou compactage.

Schématiquement, on mesure d'abord in situ le volume total V occupé par un échantillon de sol au moyen d'un densitomètre à membrane. Puis, en laboratoire, on détermine pour l'échantillon remanié son poids humide et sec.

L'essai consiste à creuser une cavité, à recueillir et peser la totalité du matériau extrait, puis à mesurer le volume de la cavité à l'aide d'un densitomètre à membrane. L'appareil est doté d'un piston qui, sous l'action de l'opérateur, refoule un volume d'eau dans une membrane souple étanche qui épouse la forme de la cavité. Une tige graduée permet de lire directement le volume (Guettouche, 2016).

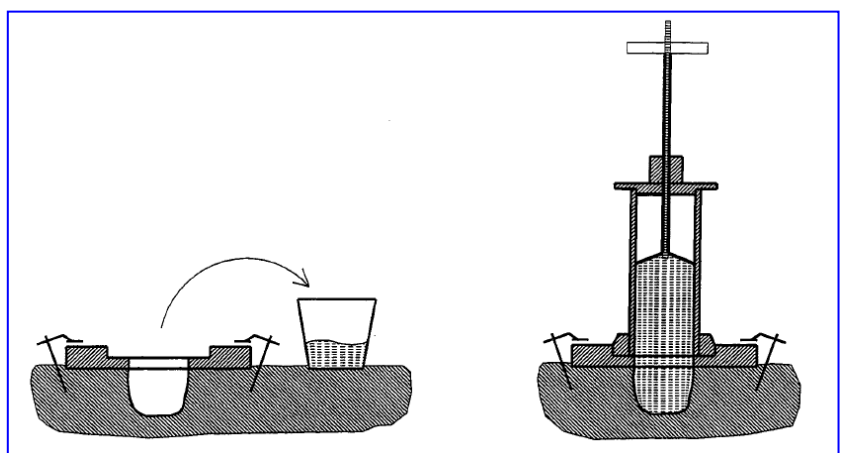


Figure 28 : Essai de densitomètre

Conclusion Générale

Le laboratoire BTP joue un rôle déterminant au niveau de toutes les étapes de réalisation d'un projet de construction. Il intervient au niveau de tous les maillons de la chaîne de construction, depuis les études géotechniques du sol, la recherche de matériaux, les essais d'informations et de recette des matériaux jusqu'à la réception des travaux ou des ouvrages. Il est également un acteur potentiel en matière d'expertises, d'avis techniques et de développement de la technologie et de la technique de construction.

La réalisation de tous les essais au laboratoire et in situ permet d'analyser les caractéristiques d'un sol destiné à recevoir des ouvrages (résistance au cisaillement, compressibilité perméabilité plasticité, etc.) ainsi donne un bilan sur la qualité des matériaux de construction.

Dans le cadre de notre travail nous avons réalisé et/ou assister à la réalisation de la plupart des essais géotechniques sur des matériaux au laboratoire et in-situ selon des normes prédéfinies. Les différents essais que nous avons effectués au niveau de laboratoire géotechnique NBR-Fès sont : les essais d'identification du sol, rhéologiques, Proctor et de compressibilité. Les essais géotechniques in situ permettent d'approfondir l'étude des sols et des roches avant toute construction en surface ou en profondeur, ces essais sont : Les sondages carottés, le pénétromètre dynamique, l'essai pressiomètre et le densitomètre à membrane. Les matériaux sur lesquels nous avons réalisé les essais géotechniques sont prélevés sur des chantiers de construction situés à la ville de Fès.

Notre stage au sein de laboratoire NBR était une très riche expérience qui nous a permis de réaliser ces essais et de les pratiquer ainsi de découvrir la réalité pratique de différents travaux et de se confronter avec le domaine professionnel.

Références Bibliographiques

- AFNOR** (Association Française de normalisation), (Mars 1993) - Limites d'Atterberg : NF P94-051
- AFNOR** (Association Française de normalisation), (Mars 1996) - Analyse granulométrique : NF P 94-056
- AFNOR** (Association Française de normalisation), (Octobre 1999) - Détermination des références de compactage d'un matériau : NF P 94-093
- AFNOR** (Association Française de normalisation), (Aout 1994) – Le cisaillement : NF P 94 071-1
- ATLAN Y.**, (1978) – Catalogue des essais géotechniques exécutés au laboratoire géotechnique d'Orléans. Rapport, Bureau de recherches géologiques et minières – Orléans, 38 p.
- FAHD F.**, (2015) – Application de quelques essais techniques sur des échantillons de la région de Kansara. PFE de licence, FST-Fès, 36 p.
- FETHALLAH Y., et MERZOUFUI A.**, (2016) - Utilisation de l'essai pressiométrique pour le calcul des fondations superficielles. Mémoire de Master, Faculté des sciences et techniques-Tébessa, 132 p.
- GUETTOUCHE A.**, (2016) - Compactage des sols. Cours, France, 37 p.
- JPE.**, (Mars 2004) – Essai Proctor. Rapport, 2IE (Laboratoire génie civil) ,7 p.
- LERAU J.**, (2006) – Géotechnique 1. Cours, INSA (Institut National Des Sciences Appliquées) -Toulouse, 33 p.
- MARTIN P.**, (2005) - Géotechnique appliquée au BTP. Edition Eyrolles, (France).
- PARRIAUX A.**, (2018) – Reconnaissance in situ. Cours de géologie de l'environnement, EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne) - Lausanne, 101p.
- PUMELLE C., JUNCUI Y., FABRE D., FOCHE.O., TABBAGH. A., HIRSCHAUER A.**, (2017) – Théorie et pratique de la géotechnique : Outil pour la conception des ouvrages. 63 p.
- RAINI I.**, (2017) - Etude géotechnique de la stabilité des sols pour la mise en place d'une chaussée : cas d'étude Jbel Bou Rdim (NE-Fès). PFE de Master, FST-Fès, 78 p.
- SETRA**, (2008) - Insertion d'une infrastructure routière : Concilier terrassements et enjeux paysagers. Guide Technique n° 84, (France).
- SLAOUI S. et RAINI I.**, (2015) - Identification et caractérisation mécanique des sols : cas de construction de chaussées. PFE de licence, FST-Fès, 49 p.
- SNIMA** (Service de Normalisation Industrielle Marocaine), (1997) - Œdométrie : NM 13.1.003,

SNIMA (Service de Normalisation Industrielle Marocaine), (1998) - Limites d'Atterberg NM 13.1.007.

SNIMA (Service de Normalisation Industrielle Marocaine),(1994) – Los Angeles NM 10.1.138.

SNIMA (Service de Normalisation Industrielle Marocaine), (2008) - Résistance à la compression des éprouvettes : NM 10.1.051

SYTRA A., (2012) - Rapport d'étude Géotechnique - Missions G11 + G12. Rapport provisoire, ARGITEC-Toulouse, 47 p.

ZERHOUNI M. I., (2011) - Pour une bonne réalisation des Ouvrages géotechniques. Salon de la Géotechnique du Forage et des Fondations, (France).

<https://www.forsol.fr/sondage-geotechniques>

<http://www.toutpourleforage.com/sondages-carottes/>