

IV.1. Introduction

Avant de commencer les essais de cisaillement sur les échantillons, on va faire plusieurs analyses pour identification d'échantillon.

IV.1.1. Organisation des essais

Sur la matrice des échantillons récupérés au niveau de gare ferroviaire du Tissemsilt, nous avons réalisé un programme d'essais comprenant:

IV.1.1.a. Essais d'identification

- Granulométrie - Sédimentométrie **NF P94-056 et NF P94-057**
- Limite d'Atterberg **NF P94-051**
- Poids spécifique (γ_s)
- Essai de Proctor **NF P94-093**

IV.1.1.b. Essais chimiques

- Évaluation de la teneur en carbonates **NA -2789**
- Évaluation de la teneur en sulfates **NA -16002**
- Valeur au bleu de méthylène **NF P94-568/1993**

IV.2. Analyse granulométrique par voie sèche

On fait La granulométrie pour déterminer les différents diamètres des grains composant les sols précédents.

IV.2.1. Appareillage

Une série de tamis diamètre de 05 mm à 0.08mm

Une balance.

IV.2.2. Mode opératoire

Les matériaux utilisés est une argile silo sableuse verdâtre, provenant de la gare ferroviaire du Tissemsilt. Nous avons tamisé l'échantillon et on a utilisé des tamis propres de diamètres (5mm à 0.08mm). On superpose les tamis selon leur diamètres d'une façon à avoir le diamètre du maille le plus grand en dessus et le plus petit en dessous c'est-à-dire l'ouverture du maille devient plus en plus étroite du haut vers le bas ou il se trouve un récipient vide (fond), (5mm - 4mm - 2mm - 1mm - 0.5mm - 0.4mm - 0.315mm - 0.2mm - 0.1mm - 0.08m. Apres on pèse le

refus de chaque tamis sans oublier la quantité qui se trouve dans le récipient (fond) en bas de la série.



Figure IV.1: Préparation des échantillons



Figure IV.2: Mode opératoire l'essai analyse granulométrique par tamisage

Les résultats de cette analyse sont résumés dans le tableau suivant:

Diamètre des tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulés (%)	Tamisâts cumulés (%)
5	04	01	99
4	09	02	98
2	19	04	96
1	27	05	95
0.5	54	11	89
0.4	69	14	86
0.315	99	20	20
0.2	140	28	72
0.1	150	30	70
0.08	153	31	69

Tableau IV.1: Analyse granulométrique par tamisage

On trace une courbe dans laquelle on porte en abscisse les modules et en ordonnées les pourcentages de matériau passant à travers chaque tamis (Figure IV.1).

IV.3. Analyse granulométrique par sédimentométrie

IV.3.1. Appareillage

Au moins 30 grammes de tamisât;

- Une balance précise au centigramme;
- Un densimètre gradué;
- Une éprouvette dont le diamètre et le volume au repère gravés sont donnés;
- Une pipette de 20cm³;
- Un agitateur électrique;
- Un récipient adapté à l'agitateur;
- Un agitateur manuel;
- Un défloculant (5% d'hexamétaphosphate de sodium);
- Un thermomètre;
- Un mortier avec pilon.

IV.3.2. Mode opératoire

La sédimentométrie est basée sur la loi de Stokes qui exprime la relation entre la vitesse de décantation d'une particule solide sphérique dans un liquide, et le diamètre de cette particule. Cet essai est effectué sur le tamisât à $80\mu\text{m}$ qui correspond à un certain pourcentage p du poids total du matériau initial (ce qui reste du matériau après passage dans le plus petits tamis disponible dont la largeur de maille est de $80\mu\text{m}$).



Figure IV.3: Préparation des échantillons

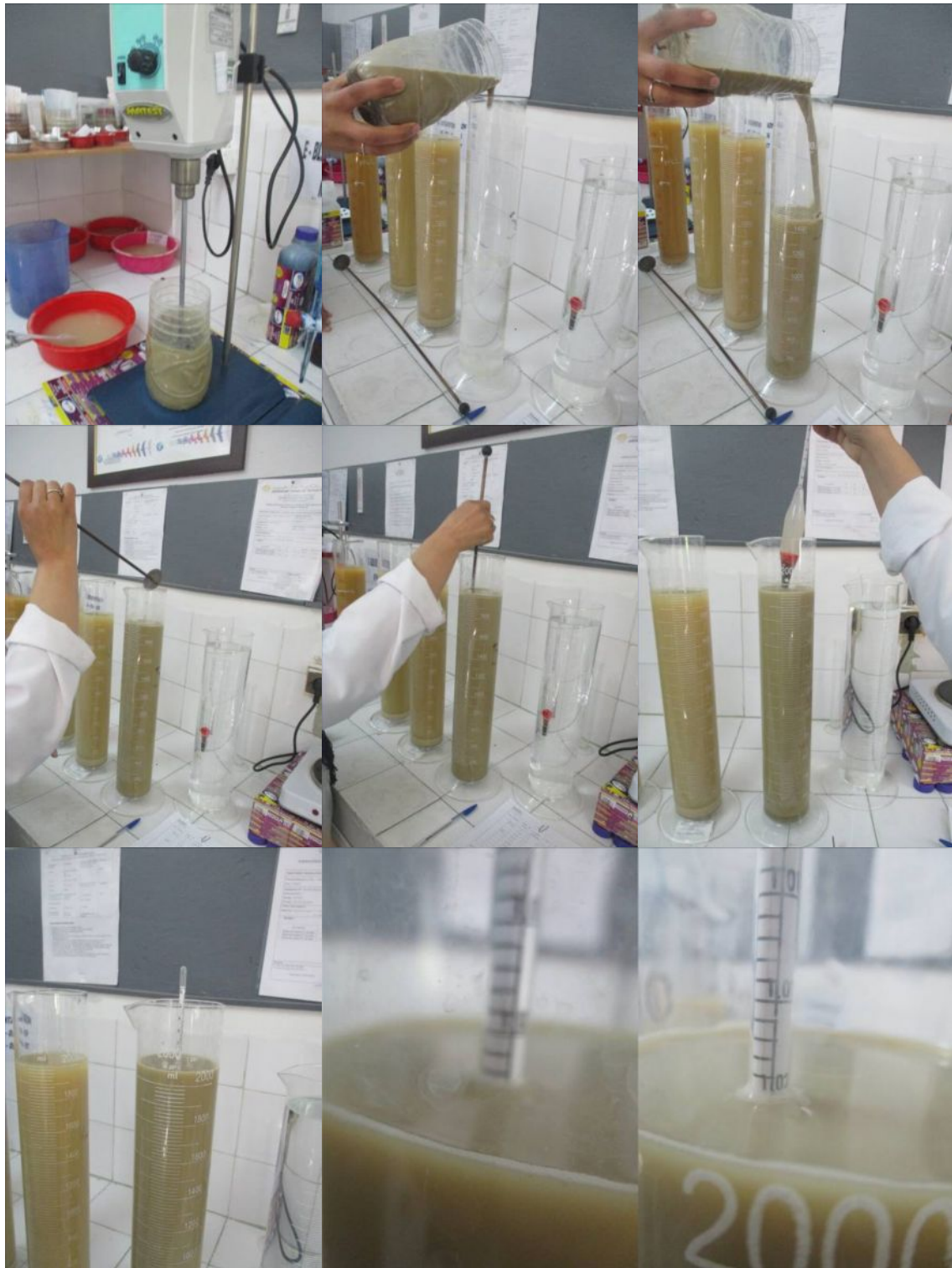


Figure IV.4: Mode opératoire l'essai analyse granulométrique par sédimentométrie

Temps de lecture	R lecture densimètre	T (°C)	Ct	P% sur tamis 80 μ m	D (μ m)
30s	1.025	23	1.1	68	59
01min	1.023	23	1.1	63	43
02min	1.021	23	1.1	58	31
05min	1.019	23	1.1	53	20
10min	1.016	23	1.1	45	14
20min	1.013	23	1.1	39	10
40min	1.010	23	1.1	31	08
80min	1.009	23	1.1	29	05
04heures	1.007	23	1.1	24	03
24heures	1.000	23	1.1	06	01

Tableau IV.2: Analyse granulométrique par sédimentométrie

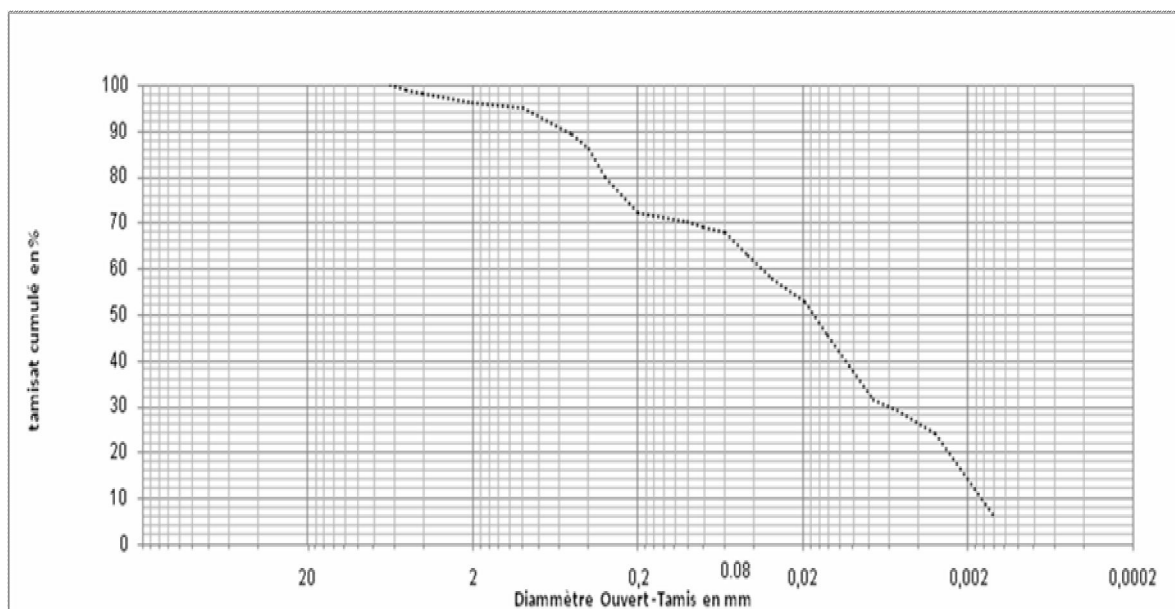


Figure VI.5: Courbe granulométrique

IV.4. Limites d'Atterberg et indice de plasticité

IV.4.1. Principe de détermination des limites d'Atterberg

L'essai s'effectue en deux phases:

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés;
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure.

IV.4.2. Mode opératoire

a. Matériel pour détermination de la limite de liquidité

- Un appareil de Casagrande.
- Une étuve de dessiccation.
- Une balance.
- Des capsules ou boîtes de Pétri, spatules, truelles.

b. Matériel pour détermination de la limite de plasticité

- Une plaque lisse en marbre.
- Des capsules ou boîtes de pétri, des spatules.
- Une balance.
- Une étuve.
- Une plaque de verre.



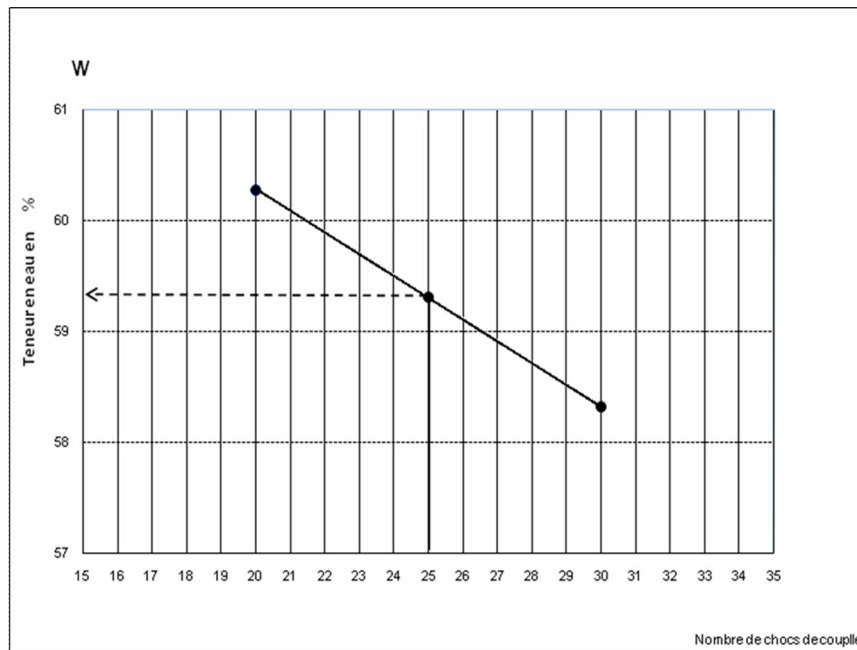
Figure IV.6: Matériel pour détermination de la limite de liquidité et la limite de plasticité



Figure IV.7: Mode opératoire pour détermination de la limite de liquidité



Figure IV.8: Mode opératoire pour détermination de la limite de plasticité



Mesure de coupelle	1		2		3	
Teneur en eau (%)	60.28		59.31		58.32	
Nombre de coupe N	20		25		30	
Teneur de plasticité	W = 37.29%	W = 36.50%	W = 38.10%	W _P = 36.79%		
	W = 35.71%		W = 35.48%			
Limite de liquidité W _L = 59.31%			Indice de plasticité I _P = 22.66%			
Limite de plasticité W _P = 36.65%						

Tableau IV.3: Détermination l'indice de plasticité.

IV.5. Poids spécifiques γ_s

IV.5.1. Appareillage

- Pycnomètre;
- Eau distillée, une balance et un thermomètre.

IV.5.2. Mode opératoire

On prend une quantité d'argile qui est tamisé de diamètre (2 mm), puis on pèse une quantité de 25 g de l'échantillon (figure).



Figure IV.9: Préparation de l'échantillon



Figure IV.10: Mode opératoire

On verse l'échantillon dans le pycnomètre après on ajout l'eau distillé qui est chauffé au 20°C puis on agite et on pèse le tous (pycnomètre + matériaux + bouchon + eau) (Figure IV.11).



Figure IV.11: Mesure de la masse totale

IV.5.3. Présentation des résultats

Masse du pycnomètre bouchon (g)	Masse pycnomètre + l'eau + bouchon (g)	Masse pycnomètre + bouchon + l'eau + sable (g)	Masse volumique γ_s (g/cm ³)
162.1	658.9	737.5	2.69

Tableau IV.4: Valeurs de la masse volumique

IV.6. Valeur de bleu de méthylène (VBS)

Cet essai permet de caractériser les argiles des granulats quant elles sont présentes en faible quantité.

IV.6.1. Appareillage et produit

Appareillage d'usage courant: Balances; Chronomètre; Tamis; Bac; Pipettes.

Appareillage spécifique: Un agitateur à ailettes; Un agitateur à barreau magnétique; Un bécher de 5000ml; Un circuit de pompage; Un spectrophotomètre.

Produit: Eau déminéralisée et distillée; Eau de javel; Blue de méthylène.

IV.6.2. Mode opératoire

- Préparation de la solution de Blue.
- Prélèvement de la masse de 30g.
- Introduire la masse dans le récipient, et mettre en suspension dans l'eau distillée.
- Agiter sous une vitesse $600 \text{ tr/min} \leq V \leq 800 \text{ tr/min}$ pendant $t \geq 5 \text{ min}$
- Si l'auréole Blue clair disparaît, procéder à de nouvelles injections de Blue jusqu'à l'apparition de l'auréole pendant $t = 5 \text{ min}$ successives.

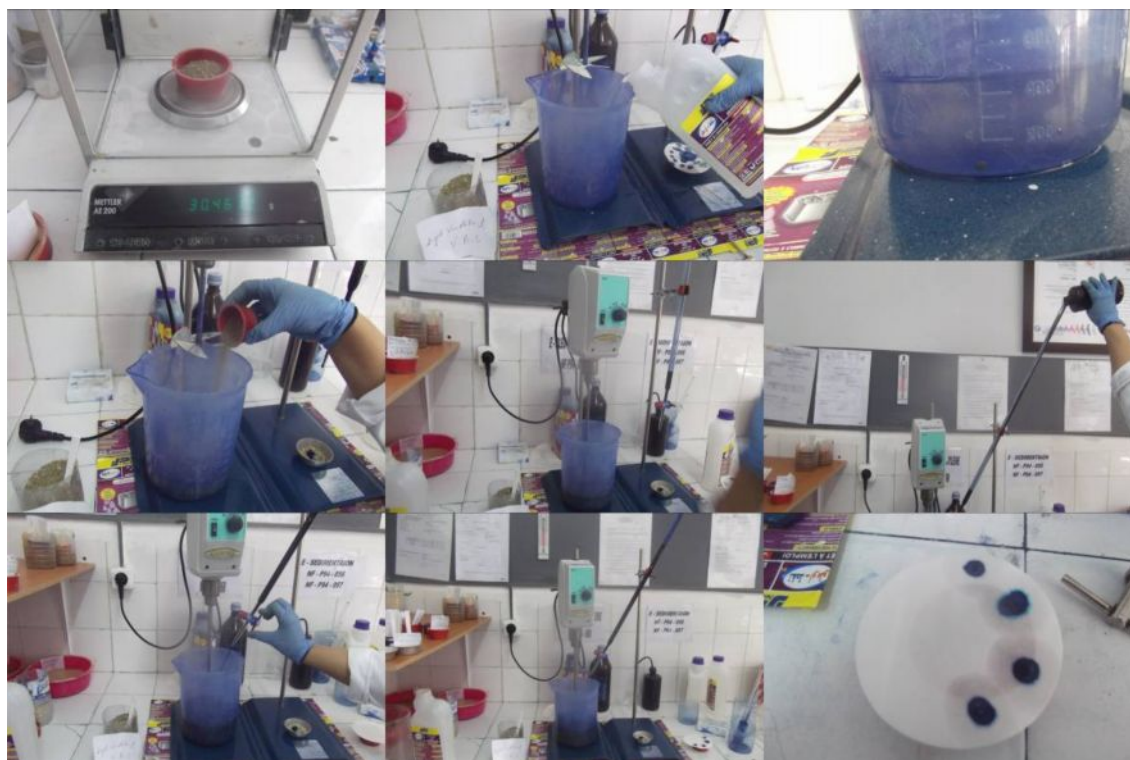


Figure IV.12: Mode opératoire d'essai de bleu méthylène

Volume (ml)	C	Fraction (%)	VBS (gr/100 gr)
89	0.99	99	2.94

Tableau IV.5: Valeurs de bleu méthylène

IV.7. Détermination de la teneur en carbonates CaCO₃

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO₂) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphériques connues) par un échantillon préparé pour l'essai, l'appareil utilisé est appelé le calcimètre.

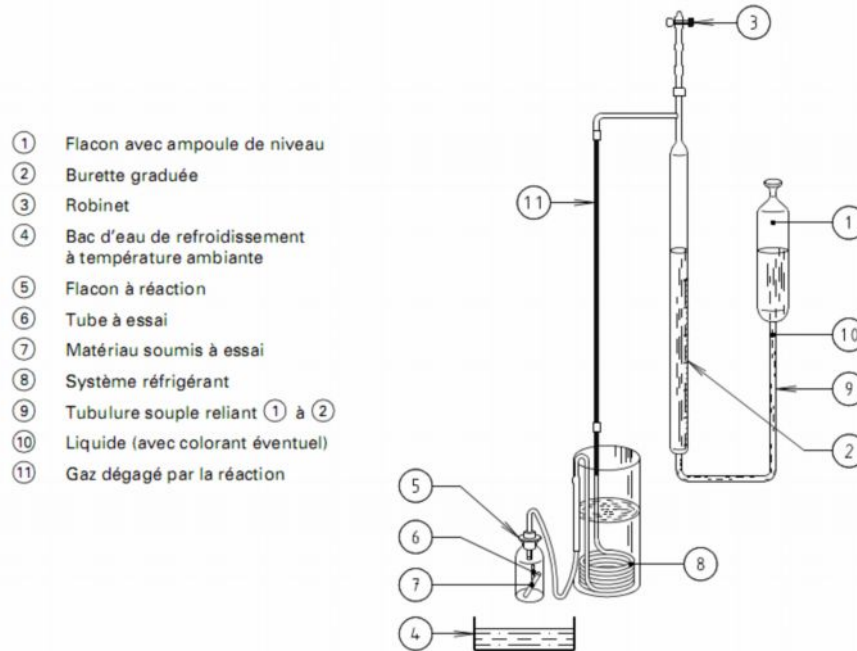


Figure IV.13: Mode opératoire

Teneur de calcaire (%)	Nature
9	Sol faiblement carbonaté

Tableau IV.6: Détermination de la teneur de calcaire

IV.8. Détermination de la de la teneur en eau en sulfates**IV.8.1. Mode opératoire**

- Peser 01 g de matière \pm mg près.
- Les introduire dans un bécher de 800ml.
- Délayer avec 20 ml d'eau distillée.
- Ajouter en remuant 10ml HCL concentré.
- Faire bouillir en agitant jusqu'à dissolution.
- Transvaser le filtrat dans un bécher de 600ml.
- Faire bouillir.
- Ajouter 15 ml de solution de Ba Cl₂ à 10%.
- Filtrer sur filtre sans cendre.
- Laver à l'eau bouillante jusqu'à disparation des chlorures (Essais au nitrate d'argent).
- Placer le filtre avec son résidu dans un creuset en porcelaine préalablement lavé. Sécher et peser (P1).
- Calciner au four à moufle pendant 15 minutes à température du $950\pm 25^{\circ}\text{C}$.
- Refroidir au dessiccateur et peser (P2).

$$SO_4^{-2}(\text{mg} / \text{kg}) = (P2 - P1) \times 0.343 \times 10^6$$



Figure VI.14: Mode opératoire

Taux de sulfate SO_4^{-2} (mg/kg)	Nature
18500	Sol est fortement agressif

Tableau IV.7: Détermination du taux de sulfate.

IV.9. Essais mécaniques

IV.9.1. Essai de compactage dans un moule Proctor

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

Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée. Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

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

IV.9.1. 1. Appareillage

Appareillage spécifique

L'appareillage spécifique comporte:

- Moule Proctor.
- Dame de compactage manuel «dame Proctor normal».
- Une règle à araser.

Appareillage d'usage courant:

- Tamis d'ouvertures de mailles carrées de dimensions nominales 5 mm.
- Balances.



Figure IV.15: Appareillage pour l'essai Proctor

IV.9.1.2. Mode opératoire

- Faire le choix de matériel (Moule, Dame); (Moule Proctor, Dame Proctor normal).
- Sécher le matériau dans une étuve réglée à 50°C maximum jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai.
- Après séchage, le matériau est tamisé à 5 mm et seul le tamisât est conservé pour l'exécution de l'essai.
- Le matériau est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en au moins cinq parts égales.
- Humidifier le sol à la teneur en eau voulue, bien homogénéiser.

Montrer la base du moule sur son socle et peser cet ensemble.

- Montrer la hausse sur le moule.
- Effectuer l'essai Proctor (Trois couches; 25 coups par couche).
- Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur d'un centimètre au maximum. Cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant radialement du centre vers la périphérie du moule. Si des éléments > 10 mm sont entraînés dans cette opération, en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, combler ceux-ci avec des éléments fins qui sont lissés avec la règle à araser.
- Peser l'ensemble du moule avec le matériau.
- Démoulage de l'éprouvette. On extrait, ensuite, un échantillon représentatif pour déterminer sa teneur en eau.

Expression des résultats

Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer:

- La teneur en eau.
- La masse de matériau sec contenu dans le moule.
- La masse volumique du matériau sec en tenant compte du volume réel du moule utilisé, déterminé à partir de mesures géométriques réalisées à 0.1 mm près.



Figure IV.16: Mode opératoire de l'essai Proctor

Poids total humide (g)	5674	5734	5763	5771
Poids du moule (g)	3955	3955	3955	3955
Poids du sol humide (g)	1719	1779	1808	1816
Poids du sol sec (g)	1433.23	1436.99	1438.87	1421.96
Volume du moule (m ³)	939.21	939.21	939.21	939.21
Densité sèche (t/m ³)	1.526	1.530	1.532	1.514
N° de la tare	1	2	3	4
Poids total humide (g)	400	400	400	400
Poids total sec (g)	344	340	331	328
Poids de la tare (g)	63	88	62	68
Poids de l'eau (g)	56	60	69	72
Poids du sol sec (g)	281	252	269	260
Teneur en eau %	19.93	23.81	25.65	27.69

Tableau IV.8: Résultats de l'essai Proctor

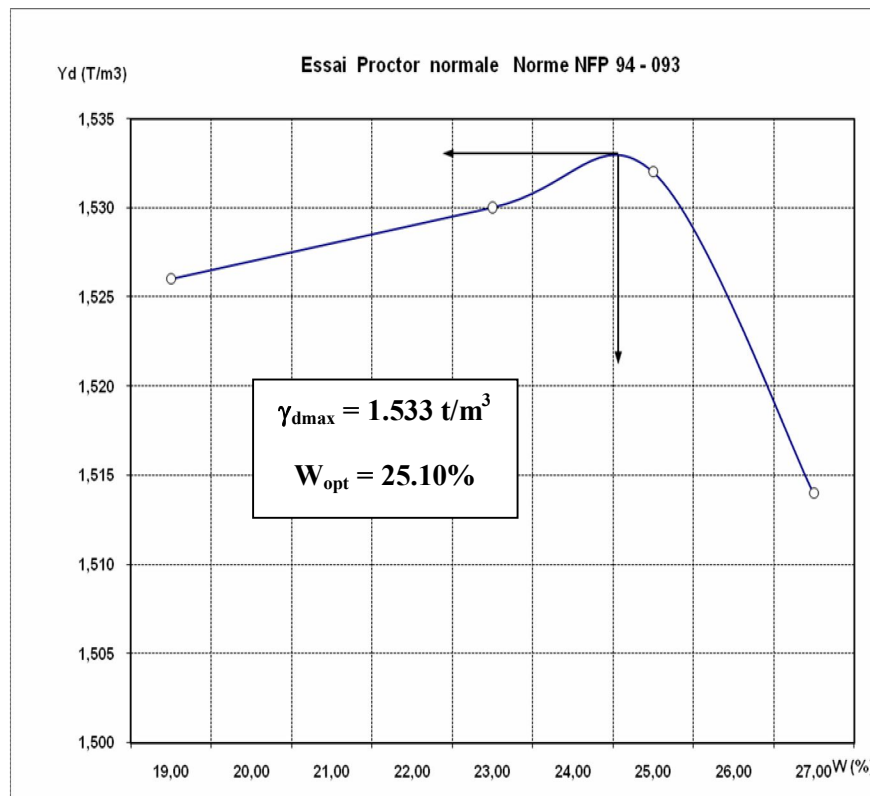


Figure IV.17: Courbe de compactage Proctor

IV.9.1.3 Préparation Des Echantillons

Nous avons remarqué une diminution de la densité sèche et la teneur en eau (γ et ω) à chaque ajout de filasse à cause du remplacement d'une quantité d'argile par des fibres de filasse et montré que la densité de filasse est plus faible que la densité d'argile. (Tableau IV.9).

Sol	ω_{opt} (%)	γ_d (t/m ³)
Argile non renforcée (0% des fibres de filasse)	25.10	1.53
Argile renforcée par 0.5% des fibres de filasse	23.21	1.53
Argile renforcée par 1% des fibres de filasse	23.13	1.52
Argile renforcée par 1.5% des fibres de filasse	22.84	1.51
Argile renforcée par 2% des fibres de filasse	22.22	1.49

Tableau IV.9: Résultats d'essai Proctor (mélange argile-filasse)

IV.10. Procédure d'essai de cisaillement

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (études de fondations, ouvrages de soulèvement, remblais, talus...), il est nécessaire de connaître la résistance du sol. Mais cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent.

La résistance d'un sol peut être définie par de nombreux critères: résistance à la compression simple, essai CBR, essai pénétrométrique, essai pressiométrique, essai triaxial et aussi essai de cisaillement rectiligne dit "à la boîte" que permet de réaliser la machine de cisaillement.

IV.10.1. Description de l'essai

IV.10.1.1. Notion de résistance au cisaillement

Lorsqu'un système de forces est appliqué à un volume déterminé de sol, il se développe, en général, des contraintes de cisaillement qui entraînent des déformations du sol. Ces déformations peuvent être importantes le long de certaines surfaces appelées "surfaces de glissement" ou "surfaces de rupture".

Par définition, la résistance au cisaillement d'un sol est la contrainte de cisaillement dans le plan de rupture, au moment de la rupture. Cependant, cette notion de résistance au cisaillement d'un sol n'est pas toujours facile à définir, que ce soit pour l'essai de laboratoire ou pour le sol dans lequel est construit l'ouvrage. En effet, si on représente l'évolution de la contrainte de cisaillement τ en fonction de la déformation ε dans le plan de cette contrainte de cisaillement, on obtient le graphique représenté page suivante sur la figure IV.18.

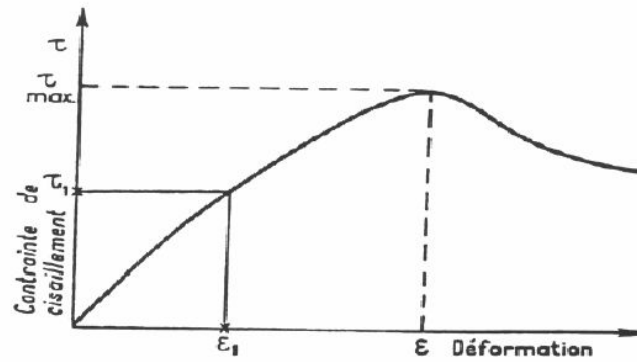


Figure IV.18: Courbe contrainte-déformation

Sur ce graphique, on peut définir la résistance au cisaillement comme:

- Le maximum de la contrainte de cisaillement τ_{\max} .
- La contrainte de cisaillement correspondant à une déformation très grande.
- La contrainte de cisaillement correspondant à une déformation plus ou moins arbitraire ϵ_1 .

Néanmoins, sauf dans certains cas particuliers, la résistance au cisaillement sera le maximum de la contrainte.

IV.10.1.2. Principe de la méthode

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un dispositif permet d'exercer sur le sol une contrainte normale σ déterminée. La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement F est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure. L'échantillon subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan imposé sur lequel on exerce une contrainte normale déterminée. Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon (Figure IV.19).

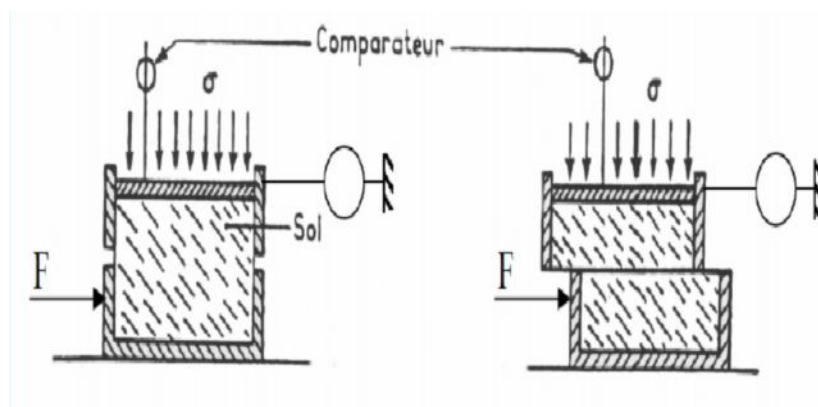


Figure IV.19: Schéma de la boîte de cisaillement

IV.10.2. Description de l'appareil

IV.10.2.1. Appareillage

La machine se compose de plusieurs éléments (Figures IV.20):



Figure IV.20: Vue d'ensemble de la boîte de cisaillement



Figure IV.21: Boîtes de cisaillement + accessoires (section circulaire, $\phi = 6\text{cm}$)

IV.10.2.1.1 Boite de cisaillement à déformations contrôlées

Elle est constituée d'un bâti métallique sur lequel repose, de la gauche vers la droite:

- Le boîtier de commande et le moteur;
- Le chariot porte-boite, entraîné horizontalement à vitesse constante par le piston. Il provoque le déplacement de la demi-boite inférieure et d'une partie de l'éprouvette d'essai;

- Le bras de réaction communiquant à l'anneau dynamométrique les efforts appliqués sur la demi-boîte supérieure lors du cisaillement;
- L'anneau dynamométrique dont les déformations indiquent les efforts tangentiels développés dans le plan de cisaillement;
- Un système levier-étrier, appliquant sur le piston de la boîte les charges normales désirées à l'aide des différents poids.

IV.10.2.1.2. Boîte de cisaillement du laboratoire

De forme cylindrique, la boîte de cisaillement comporte (Figure IV.21):

- Une demi-boîte inférieure;
- Une demi-boîte supérieure;
- Deux vis permettant de solidariser les deux demi-boîtes avant l'essai (pour faciliter la mise en place de l'échantillon);
- Un piston pour la consolidation;
- Deux pierres poreuses plates;
- Deux plaques de drainage;
- Le piston et la demi-boîte inférieure possèdent des orifices pour la mise en eau de l'échantillon.

IV.10.2.1.3. Bâtis de consolidation

- Les bâtis de consolidation comportent:
- Un disque à leur extrémité sur lequel reposent les poids,
- Une tige support de comparateur pour la mesure du tassement des éprouvettes d'essais.

IV.10.2.1.4. Poids

Ce sont des disques métalliques plats. Ils sont fendus afin de permettre leur centrage et leur superposition sur le plateau de charge du levier du bâti de consolidation. Chaque bâti de consolidation dispose de sa propre série de poids afin de pouvoir effectuer simultanément la consolidation de différentes éprouvettes d'essais sous les contraintes normales désirées.

IV.10.3. Installation de l'appareil

Il est impératif de fixer la machine de cisaillement au sol (des trous sont prévus à cet effet). La machine doit être alimentée par du 220V monophasé.

Les deux comparateurs devront être installés une fois la boîte de cisaillement mise en place et la charge verticale appliquée.

IV.10.4. Utilisation de l'appareil

IV.10.4.1. Mise en place de l'échantillon dans la boîte

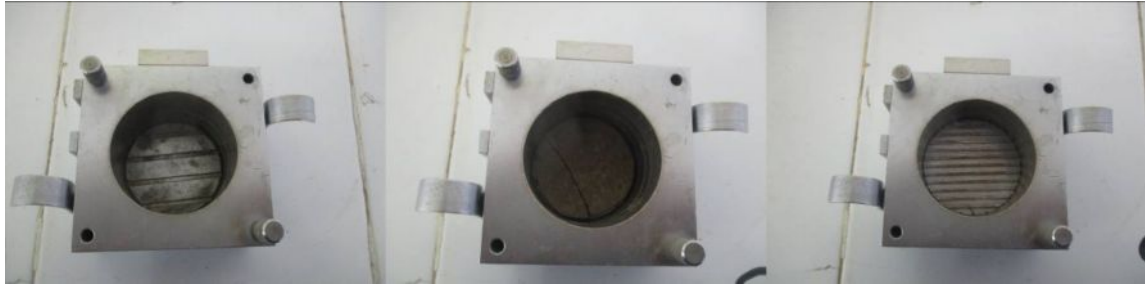


Figure IV.22: Préparation des plaques drainantes



Figure IV.23: Préparation de l'échantillon (section circulaire $\phi = 60\text{mm}$)



Figure IV.24: Détermination de la masse de l'échantillon



Figure IV.25: Mise en place de l'échantillon dans la boîte

IV.10.4.2. Mise en place de la boîte et réglage des comparateurs

Mettre l'éprouvette dans le châssis étanche fixé sur le bâti; Fixe le système de mesure de l'effort de cisaillement horizontal (T); Régler la position du capture de mesure de déplacement relatif horizontale entre les deux demi-boîtes; Positionner le capture de mesure du déplacement verticale du piston par rapport à un repère fixe; Placer l'étrier de charge sur le piston de charge (100, 200 et 300 kPa); On positionne les aiguilles des comparateurs à zéro et on met la machine en marche (Figure IV.26)

Remarque: Avant de commencer l'essai, il faut ôter les vis de blocage de la boîte. Introduire l'éprouvette dans les deux demi-boîtes solidarisiées



Figure IV.26: Mise en place de la boîte et réglage des comparateurs

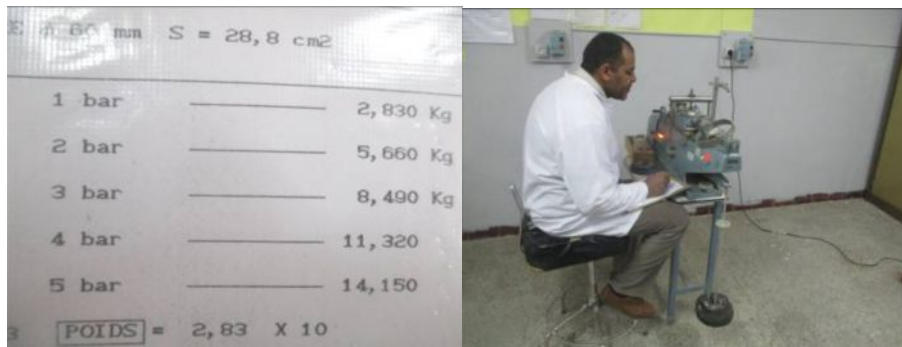


Figure IV.27: Réalisation l'essai

IV.11. Conclusion

Ce chapitre comporte une présentation des différents dispositifs et techniques expérimentales utilisés pour la réalisation des essais de cisaillement. Nous avons également présenté les caractéristiques de l'argile étudiée ainsi que les différentes étapes de fabrication et la mise en place de l'échantillon jusqu'à l'étape de cisaillement.