

4.1. Introduction

Dans le but d'obtenir une meilleure connaissance du comportement mécanique des sols représentés ici par des mélanges de sable et de limon, nous avons tenté de mettre en évidence le rôle de l'influence des mélanges (sable, limon) sur la résistance au cisaillement. Pour identifier les mélanges utilisés, des essais ont été réalisés pour la détermination des caractéristiques physiques du sable et limon. Des essais mécaniques ont permis aussi de déterminer les caractéristiques de cisaillement.

Les essais d'identification ont été réalisés au laboratoire de mécanique des sols du département de génie civil de Tiaret, les essais de cisaillement ont été réalisés au laboratoire des travaux publics de l'ouest (L.T.P.O) de Tiaret.

4.2. Caractéristiques physiques du sol utilisé

Dans cette partie on détermine les caractéristiques physiques du sol et des fines utilisés ainsi que la description du matériel utilisé dans l'identification des caractéristiques physiques du sol ainsi que les résultats obtenus de cette caractérisation.

Les caractéristiques physiques du sable propre d'Oued Chlef ainsi que celles des fines de Chlef et de Sidi Ameer seront présentées. Les photos du sol de base (sable propre de Chlef) ainsi que celles des deux types de fines utilisés comme des ajouts sont représentées dans les figures 4.1, 4.2 et 4.3.

Le sable de Chlef comme son nom l'indique provient du lit de l'Oued Chlef dont le cours d'eau passe dans la région de Chlef (Ex El Asnam, Algérie), (Ville sévèrement touchée par le séisme du 10 Octobre 1980; évalué par une Magnitude de 7.3 à l'Echelle de Richter).

Le sable de Chlef de couleur grise et à granulométrie moyenne a été tamisé à 2mm. Il est composé de grains quartzueux homogènes lisses solides et résistants à la rupture.

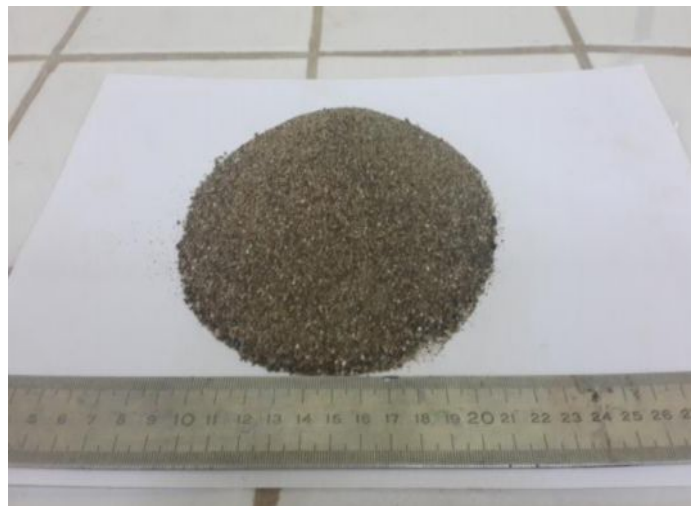


Figure 4.1: Photo du sable propre d'Oued Chlef

Les fines de Chlef comme leur nom l'indique, sont extraites à partir du sable naturel de Chlef en le faisant passer au tamis 0.08mm et en le lavant. Par contre le limon de Sid Ameer est extrait à partir d'un gisement situé dans la localité de Sid Amer au nord de la ville de Chlef.



Figure 4.2: Limon de Chlef

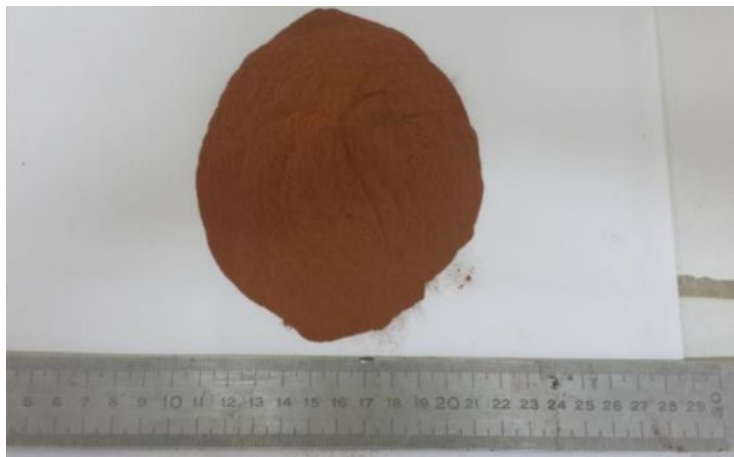


Figure 4.3: Limon de Sidi Ameer

4.2.1. Analyse granulométrique

4.2.1.1. Définition

L'essai granulométrique permet de déterminer les pourcentages des grains selon leurs diamètres, en tamisant un sol sec sur une cascade de tamis de diamètres connus. Pour la réalisation des ouvrages, le concepteur doit passer par l'étude du sol qui a un rôle important pour le dimensionnement surtout les fondations. Le sol doit subir à des essais in situ et des essais dans les laboratoires pour qu'on puisse connaître ses composantes, l'identifier et le classer.

Dans cet essai nous procédons à l'analyse granulométrique d'un échantillon dont les particules ont un diamètre $D > 80\mu\text{m}$.

4.2.1.2. But de l'essai

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer le poids des éléments d'un matériau, et les dimensions de leurs grains.

4.2.1.3. Matériels utilisés

Le matériel utilisé est composé de (Figure V.3)

- 1- Une série des tamis
- 2- Une balance.
- 3- Un sol de masse 500g.
- 4- Un couvercle pour fermer les tamis.
- 5- Un fond de tamis.
- 6- Une tamiseuse mécanique.



Des tamis



Une tamiseuse électrique



Une balance

Figure 4.4: Matériel utilisé dans l'analyse granulométrique

On utilise des tamis dont les ouvertures carrées de dimensions normalisées, sont réalisées soit à partir d'un maillage métallique, soit par perçage d'une tôle.

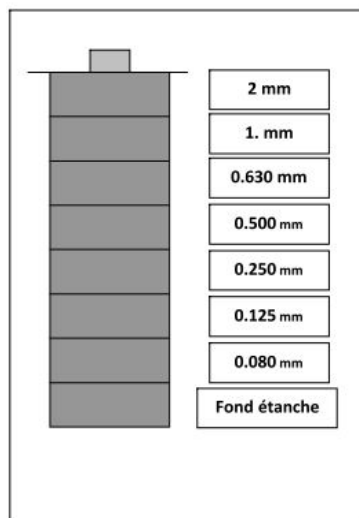


Figure 4.5: Série des tamis utilisés dans l'analyse granulométrique.

Pour un travail aisé et aux résultats reproductibles, il est conseillé d'utiliser une machine à tamiser électrique qui travaille par un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales, à la colonne de tamis.

Les dimensions les plus utilisés se suivent par une progression géométrique depuis le tamis 0.08mm jusqu'au tamis 2mm. (Figure 4.5) Pour des ouvertures inférieures à 63 μ m, l'analyse granulométrique n'est pas adaptée et l'on peut procéder par l'analyse granulométrique par sédimentométrie.

L'analyse granulométrique consiste à classer en classe granulaire un échantillon d'essai, la sédimentation est la suite de cette analyse et a pour objet de déterminer la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol.

4.2.1.4. Appareillage

Le tableau suivant présente les différents matériels utilisés dans l'analyse granulométrique

Tableau 4.1: Matériels utilisées dans l'analyse granulométrique.

Analyse granulométrique par tamisage	Analyse granulométrique par sédimentation
<ul style="list-style-type: none"> - Série des tamis; - Echantillon de sable; - Tamiseuse électrique; - Balance électrique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Eprouvettes d'essai; - Eau distillée ou déminéralisée; - Agitateur manuel; - Densimètre; - Thermomètre; - Chronomètre; - Une quantité d'Hexamétaphosphate; - Une quantité de sol (fines).

4.2.1.5. Préparation de l'échantillon

Il faut une quantité convenable pour que l'échantillon soit représentatif et que la durée d'essai soit acceptable. La masse utilisée est tel que: $m \geq 0.2D$, ou D est le plus grand diamètre de la particule en (mm), on prend pour cela une valeur de m égale à **500g** ($200D \leq m \leq 600D$).

4.2.1.6. Conduite de l'essai

La masse de sable séchée est versée dans la série de tamis choisis de manière telle que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. Toute la colonne est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique, en fixant l'amplitude pendant une durée de 10 minutes minimum. On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1%

entre deux séquences de vibration de la tamiseuse. Les résultats des refus sont exprimés en pourcentage de la masse sèche de départ.

4.2.1.7. Expression des résultats

Les résultats des essais granulométriques du sable propre de Chlef ainsi que des mélanges sable propre de Chlef + fines de Sidi Amer et sable propre de Chlef+ fines de Chlef en différents pourcentages sont représentés dans les figures 4.6, 4.7 et 4.8.

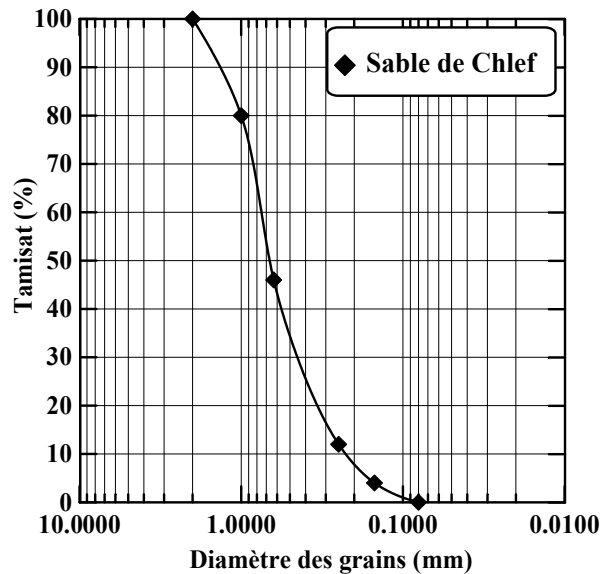


Figure 4.6: Courbe granulométrique du sable de Chlef

4.2.2. Essai au pycnomètre

4.2.2.1. But d'essai

Le but de l'essai au pycnomètre est de déterminer le poids volumique de la matière constituant les grains solides d'un sol qui est désigné par (γ_s) puisque on a plusieurs type de sols et chacun à une composante différente de l'autre en déterminant la valeur du poids spécifique on peut savoir de quelle matière sont formés ses grains.

4.2.2.2. Principe de l'essai

Cet essai utilise le principe de la poussée d'Archimède (le poids du liquide déplacé égale au poids du corps plongé dans le liquide). Donc on mesure le volume d'eau déplacé lors de l'introduction d'un certain poids de sol sec la connaissance du poids des grains solides et de leur volume, ce qui permet de calculer le poids volumique (γ_s).

4.2.2.3. Appareillage

L'appareillage suivant est utilisé dans cet essai (figure 4.9):

- Un pycnomètre.
- Une balance de précision.
- Un flacon d'eau distillée.
- Un échantillon du sol sec.
- Un chauffage électrique.



Figure 4.7: Essai au pycnomètre.

4.2.2.4. Exécution des essais

Pour réaliser cet essai, on a commencé par mettre de l'eau distillée dans le pycnomètre et on pèse l'ensemble (pycnomètre + eau) et on note le poids (P_1). Puis on met une quantité de sol dans le pycnomètre qui était rempli d'eau et on pèse le tout (Pycnomètre + eau + sol) et on note le poids (P_2). On agite le contenu du pycnomètre ensuite on chauffe l'ensemble pour séparer les grains solides.

Après un certain temps on ajoute de l'eau distillée jusqu'au repère fixe et on pèse l'ensemble et on note le poids (P_3). Après ce pesage, on nettoie bien le pycnomètre et on le remplit avec de l'eau, jusqu'au repère fixe (choisit pour mesurer P_3) et on pèse l'ensemble (eau + pycnomètre) le poids obtenu est (P_4) (Tableau 4.2 et 4.3). Le poids volumique des grains solides (γ_s) est donné par:

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s} = \frac{(P_2 - P_1)}{P_4 + (P_2 - P_1) - P_3} \times \gamma_w$$

Avec: $\gamma_w = 1 \text{ g/cm}^3$

4.2.2.5. Masse volumique des grains solides (ρ_s)

La norme (NF P94-054) a pour objet la détermination, au pycnomètre à eau de la masse volumique des grains solides (ρ_s) de sol, appelée aussi masse réelle. La masse volumique des particules solides

est le quotient de la masse des particules solides (m_s) par leur volume (V_s): quotient de la masse des particules solides (m_s) par leur volume (V_s):

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

4.2.2.6. Masse volumique sèche (ρ_d)

La masse volumique sèche (ρ_d), est le quotient de la masse des particules de sol sec (P_s) par le volume total de la même masse de sol (V), y compris le volume des vides:

$$\rho_d = \frac{P_s}{V}$$

4.2.2.7. Indice des vides (e)

L'indice des vides(e), est le rapport du volume des vides (V_v) au volume des grains solides(V_s).

L'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà déterminés (ρ_s et ρ_d) selon la formule:

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

Les valeurs de l'indice des vides minimal et maximal sont déterminées par la norme NF P94-59.

Les tableaux 4.2, 4.3 et 4.4 résument les caractéristiques physiques des différents mélanges.

Tableau 4.2: Caractéristiques physiques du sable de Chlef

e_{\min}	e_{\max}	$\gamma_{d\min}$ (g/cm ³)	$\gamma_{d\max}$ (g/cm ³)	γ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	C _u	Forme des grains
0.535	0.854	1.34	1.73	2.68	0.22	0.68	3.38	Arrondie

Tableau 4.3: Caractéristiques physiques du mélange sable-limon (Sidi Amer)

Sable-Limon de Sidi Ameer (%)	0	5	10	15	20
γ_s (g/cm ³)	2.664	2.665	2.667	2.668	2.669
e_{\max}	0.770	0.751	0.745	0.736	0.724
e_{\min}	0.490	0.458	0.428	0.385	0.366

Tableau 4.4: Caractéristiques physiques du mélange sable-limon (Chlef)

Sable-Limon de Chlef (%)	0	5	10	15	20
γ_s (g/cm ³)	2.680	2.681	2.682	2.683	2.684
e_{\max}	0.854	0.829	0.798	0.770	0.748
e_{\min}	0.535	0.490	0.472	0.462	0.431

L'analyse sédimentométrique de limon a été réalisée selon la norme NF P94-057, sur la fraction 80µm. Les résultats de l'analyse sont traduits sous forme d'une courbe semi-logarithmique, illustrée sur la figure 5.8.

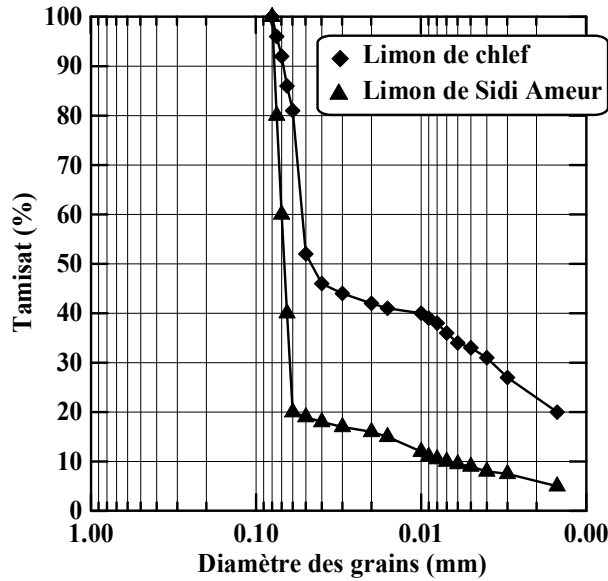


Figure 4.8: Courbes granulométriques du limon de Chlef et de Sidi Amer

La figure 4.9 et 4.10 représentent les courbes granulométriques des mélanges sable-limon de Chlef et sable-limon de Sidi Ameer pour différentes teneurs en fines variant de 0 à 20%.

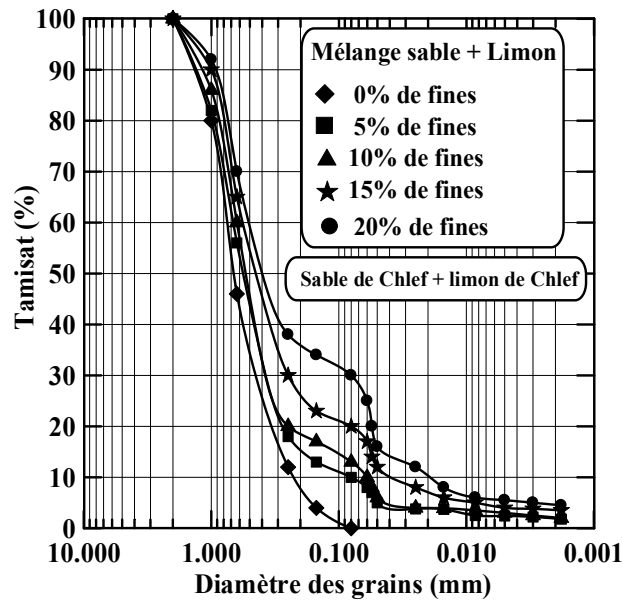


Figure.4.9: Courbe granulométrique de sable Chlef et limon de Chlef

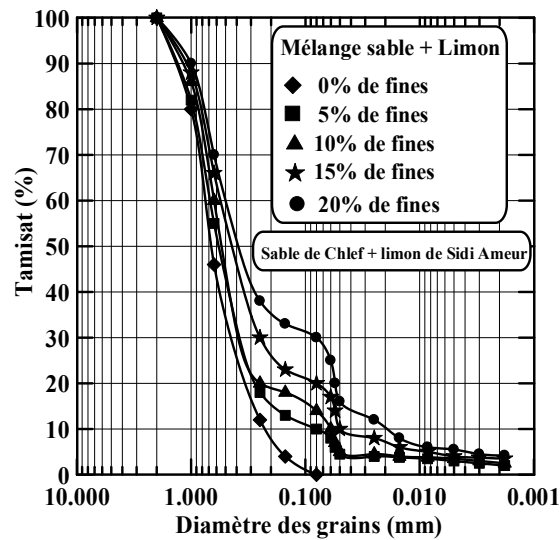


Figure.4.10: Courbe granulométrique de sable Chlef et limon de Sidi Ameur

4.2.3. Détermination des limites d'Atterberg

La présence des couches d'eau adsorbées autour des particules d'argile, confère au matériau la faculté de former des pâtes, dans lesquelles chaque particule reliée aux autres par des forces de cohésion. Il en résulte le phénomène de consistance, qui peut être modifié en fonction de la teneur en eau du sol. Des résultats concordants ont été trouvés par J. Costet et G. Sanglerat (1983).

En effet, trois états du sol argileux sont à distinguer, en fonction de sa teneur en eau qui décroît depuis une valeur élevée: état liquide, plastique et solide. La transition d'un état à l'autre est progressive. En pratique, les teneurs en eau limites (limites de liquidité et plasticité) sont fixées conventionnellement entre les différents états, en les mesurant en laboratoire, par l'intermédiaire d'essais normalisés (NF P94-051). Par définition, la limite de plasticité (W_P) correspond à la teneur en eau suffisante, pour permettre une liberté de déplacement relatif des particules, mais trop faible pour les éloigner, de façon à réduire considérablement les forces de liaisons entre elles. Elle est déterminée par la méthode du rouleau. Par contre, la limite de liquidité (W_L), peut être considérée comme la mesure de la quantité d'eau qui éloigne suffisamment les particules, les unes des autres, de façon à annuler pratiquement les forces interparticulaires. Elle est déterminée au laboratoire au moyen de la coupelle de Casagrande. A partir de ces définitions, nous introduisons un autre paramètre appelé « indice de plasticité » (I_P). Celui-ci représente la plage des teneurs en eau pour laquelle les limites de liquidité et de plasticité constituent les bornes supérieure et inférieure du comportement plastique du matériau. L'indice de plasticité est défini donc par la relation:

$$I_P = W_L - W_P$$

Les limites d'Atterberg, ont été réalisées conformément à la norme NF P94-051, sur la fraction 400 μ m. Les valeurs obtenues sont:

Tableau 4.5: Caractéristiques des deux limons

Propriétés	Limon de Chlef	Limon de Sidi Ameer
γ_s (g/cm ³)	2.70	2.691
e_{max}	1.42	1.562
e_{min}	0.73	0.878
W_L (%)	27.06	29.05
W_P (%)	21.25	23.18
I_P (%)	5.81	5.87

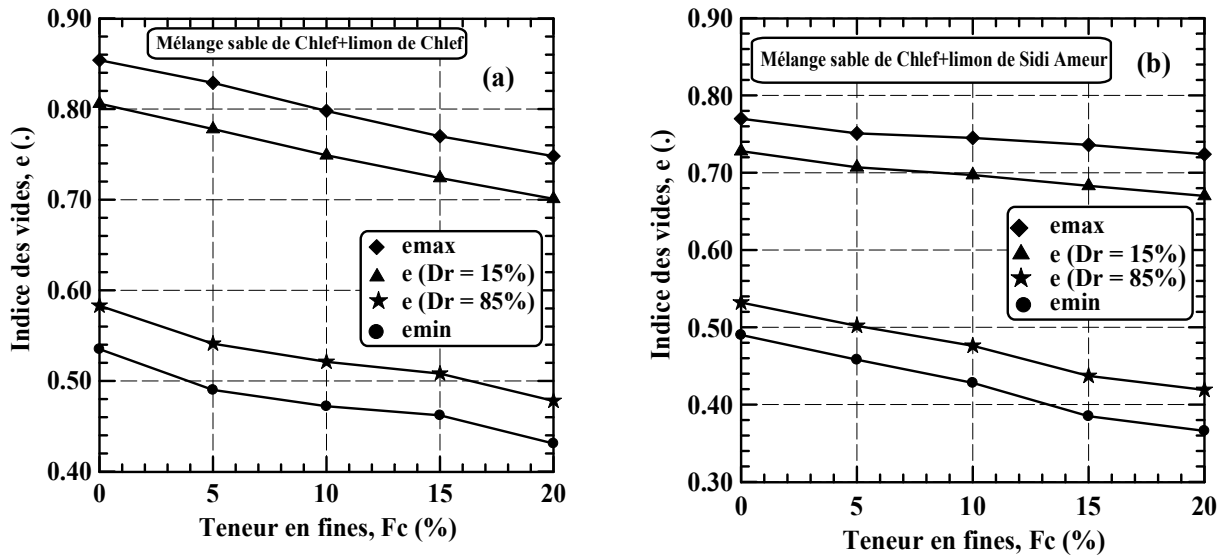


Figure.4.11: Variation de l'indice des vides maximal et minimal en fonction de la teneur en fines.
(a) Sable-limon de Chlef, (b) Sable-limon de Sidi Ameer

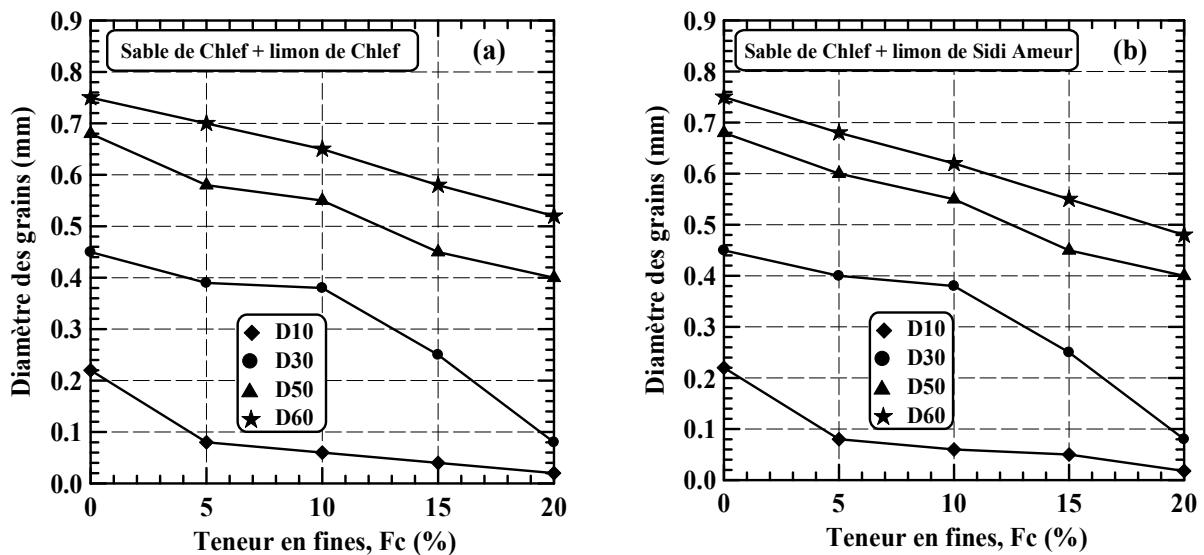


Figure.4.12: Variation des diamètres des grains en fonction de la teneur en fines.
(a) Sable-limon de Chlef, (b) Sable-limon de Sidi Ameer

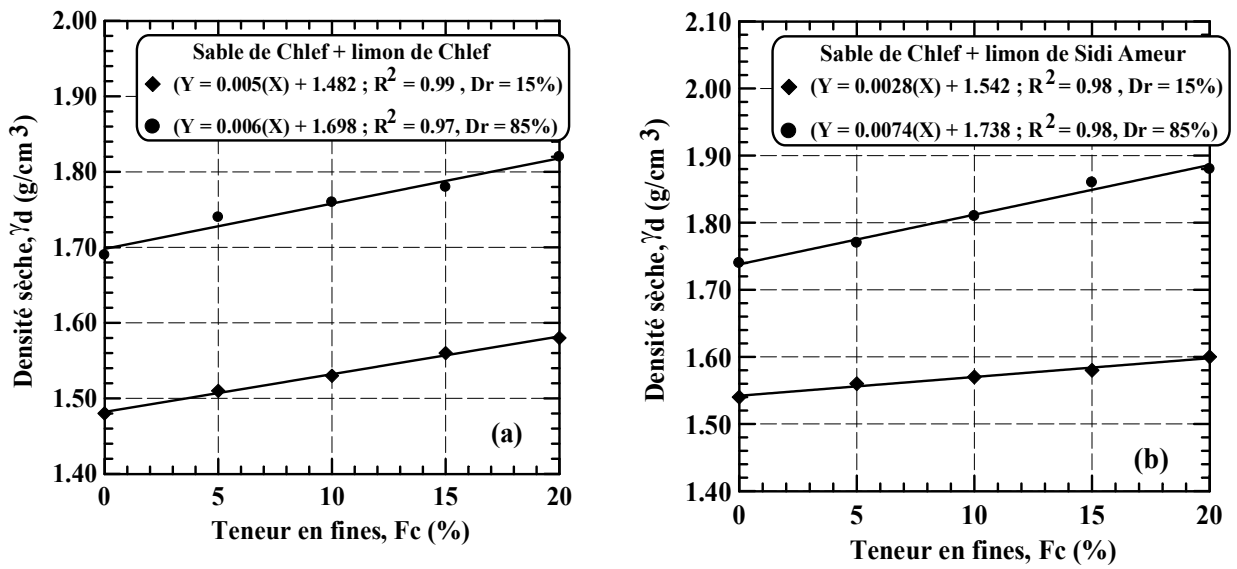


Figure.4.13: Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en fines.

(a) Sable-limon de Chlef, (b) Sable-limon de Sidi Ameur

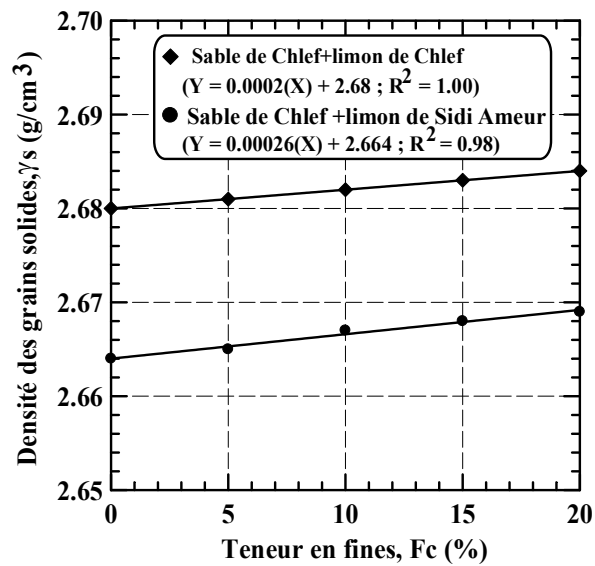


Figure.4.14: Variation de la densité des grains solides en fonction de la teneur en fines.

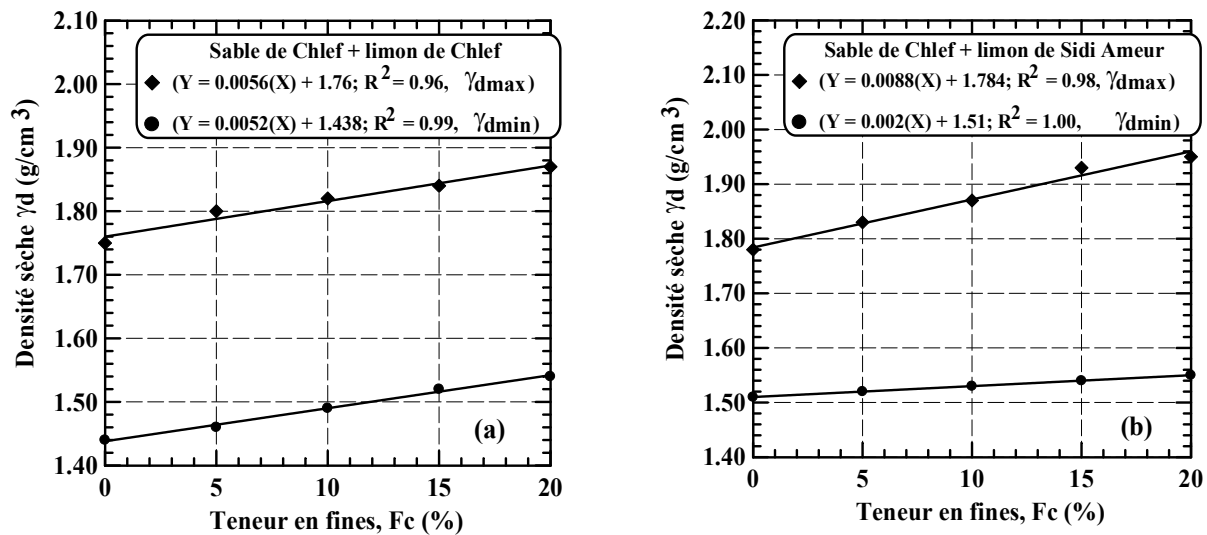


Figure.4.15: Variation de la densité sèche maximale et minimale en fonction de la teneur en fines.

(a) Sable-limon de Chlef, (b) Sable-limon de Sidi Ameur

4.3. Dispositif expérimental

Cet essai est issu d'après les expériences réalisées par coulomb, il s'effectue à l'aide d'une boîte de cisaillement. Cette boîte est constituée de deux parties se déplaçant l'une par rapport à l'autre dans un plan horizontal. L'essai consiste à placer un échantillon de sol dans une boîte de cisaillement et à la soumettre à une charge verticale N et à une charge horizontale T , que l'on augmente progressivement jusqu'à la rupture. La vitesse à laquelle on augmente la charge horizontale doit être assez faible pour assurer les meilleures conditions de drainage possibles et dissiper toutes les pressions interstitielles. Le plan de rupture se développe progressivement le long du plan horizontal imposé par le déplacement de la partie inférieure de la boîte de cisaillement sur sa partie supérieure. La charge horizontale maximale T enregistrée définit les conditions de rupture. En mesurant l'aire corrigée (A_c) sur laquelle agissent les charges N et T , on peut calculer directement la contrainte normale effective (σ_{nrupt}) et la résistance au cisaillement effective à la rupture (τ_{rup}).

4.3.1. Objectif et exigences

L'essai de cisaillement direct permet de mesurer les résistances au cisaillement de pic et résiduelle en fonction de la contrainte normale au plan de cisaillement. Lorsqu'on détermine les caractéristiques de surface d'une discontinuité qui déterminent la résistance au cisaillement, il convient de réaliser une description précise de l'essai, comportant le type et la rugosité du joint, le type et l'épaisseur du matériau de remplissage, et la présence d'eau dans le joint. Les éléments suivants doivent être spécifiés, en plus des exigences indiquées:

- L'orientation de l'éprouvette et ses dimensions;
- Les spécifications de la machine d'essai;

- La vitesse de déplacement de cisaillement pendant l'essai;
- Les valeurs de la contrainte normale à imposer pendant les essais de cisaillement direct.

4.3.2. Appareillage utilisé

Les essais ont été effectués au moyen de l'appareillage du laboratoire des travaux publics de l'ouest (L.T.P.O) de Tiaret (Figure 4.16). La boîte de Casagrande, le bâti de consolidation sur lequel on dépose la boîte, est surmontée d'un étrier recevant les poids qui vont fournir la charge N .



Figure 4.16: Photo de la boîte de cisaillement de direct du laboratoire de MDS.

Le dispositif est constitué comme suit:

- Pierre poreuse: Elles permettent de drainer l'échantillon et elles assurent une bonne adhérence entre l'échantillon et les demi-boîtes.
- Demi-boîte supérieur: formée d'un cadre et d'un piston elle permet de respecter la charge verticale N sur l'échantillon seulement.
- Demi-boîte inférieur: Elle est fixe et elle sert de moule.

Dispositif à contrainte contrôlée: il entraîne la demi boîte inférieure à vitesse constante la mesure de la contrainte de cisaillement τ et s'effectue par un dynamomètre (figure 4.17).

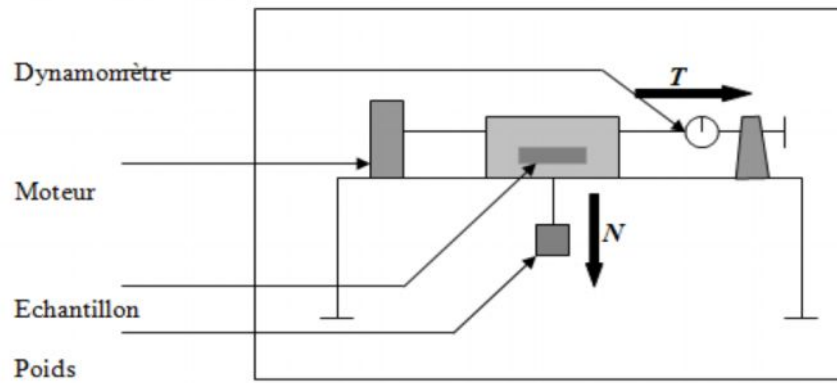


Figure 4.17: Schéma de disposition

- La boîte de cisaillement (de section intérieure $A = 1 \times 1 = 60 \times 60 \text{ mm}^2$) composée de deux demi-boîtes. La partie supérieure est immobile et la partie inférieure est mobile et contiennent des plaques drainantes.
- Le dispositif de l'application de l'effort normal désiré.
- Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi - boîtes.
- Un anneau dynamométrique indiquant les efforts de cisaillements.
- Un comparateur au 1/1000 de millimètres indiquant les déplacements horizontaux.
- Un comparateur au 1/1000 de millimètres indiquant les déplacements verticaux.

4.3.3. Principe de fonctionnement

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent coulisser horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un piston permet d'exercer sur l'échantillon une contrainte normale σ . L'essai consiste à tirer horizontalement sur une des mâchoires (généralement la mâchoire inférieure) de façon à cisailier le sol. On mesure F en fonction des déformations horizontales ΔL . L'essai se fait à une vitesse contrôlée v dont dépendant les facteurs C et ϕ .

4.3.4. Remarque

La section peut être carrée ou cylindrique selon la forme du moule, de la cellule et de l'appareille utilisée. Les valeurs de C et ϕ dépendent des conditions d'essai à savoir, vitesse de déplacement, drainage, etc...

4.3.5. Mode opératoire

Les essais de cisaillement sont réalisés selon la norme française (NF P94-071-1). Les mélanges sable et limons sont mis dans la boîte de cisaillement.

4.3.6. Préparation de l'échantillon

On prélève un échantillon de sol représentatif en quantité suffisante pour effectuer au moins trois essais avec des charges verticales différentes ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa) et de densité variée (lâche et dense), On choisit la boîte de cisaillement en fonction du type de sol. La boîte dont la section intérieure est carrée convient parfaitement aux sols pulvérulents, tandis que qu'il est préférable d'employer la boîte circulaire avec les sols cohérents. La largeur ou diamètre intérieur de la boîte devrait être supérieure à 5cm.

Le diamètre équivalent des plus grosses particules dans les cas des sables: On se sert couramment de la boîte de cisaillement carrée de 6cm de côté. Si le sol contient une certaine quantité de gravier, il faudra utiliser une boîte de 10cm ou de 30cm de côté. On assemble solidement les deux parties de la boîte de cisaillement au moyen de deux vis de blocage et on mesure sa hauteur (H), sa longueur (L) et sa largeur (l) à l'intérieur on présume que la longueur est parallèle à la direction du déplacement. On installe ensuite la plaque de soutien au fond de la boîte, puis on place une pierre poreuse et une plaque rainurée perforée par-dessus. On dépose le sol dans la boîte suivant une méthode qui permet de reproduire le plus fidèlement possible les conditions que l'on veut mesurer. On peut préparer les échantillons selon plusieurs méthodes, notamment déversement à sec (air pluviation), sédimentation, placement humide, sous compaction.

4.3.7. Lecture

Pour tous les essais on lit les déformations de l'anneau des déplacements de 4/10min c'est-à-dire toutes les 15 secondes pour les vitesses 1.0mm /min Arrêter 1 essai lorsque la contrainte de cisaillement devient constante ou quand les valeurs lues décroissent.

4.3.8. Fin de L'essai

- Enlever les poids du plateau de la charge;
- Débloquer l'anneau dynamométrique;
- Enlever la boîte du chariot de l'appareil;
- Sortir l'éprouvette de la boîte;
- Mesurer le poids spécifique fin.

4.3.9. Déroulement de l'essai

Après avoir préparé l'échantillon et mis dans la boîte de cisaillement:

- Appliquer sur la face supérieure de l'échantillon un effort vertical (N), résultant des poids placés sur le plateau, engendrant ainsi une contrainte normale $\sigma_n = 100, 200, 300$ kPa, maintenue constante toute le long de l'essai;

- Régler la vitesse de la machine, de façon à imposer un déplacement horizontal relatif constant entre les deux demi-boîtes, (1 mm/min) dans notre cas;
- Mettre tous les comparateurs (déplacement horizontal, déplacement vertical et force) à zéro;
- Actionner la machine et prendre des lectures sur les trois comparateurs simultanément;
- La rupture est caractérisée par l'apparition du pic ou par l'existence d'un palier, ce qui permet d'arrêter l'essai après 4 à 5 lectures décroissantes ou stabilisées, si non, on arrête à la déformation horizontale maximale;
- Après avoir terminé l'essai, on convertit toutes les lectures obtenues sur les différents comparateurs en unités de calcul.

4.3.10. Expression des résultats

Les lectures obtenues sur les différents comparateurs, sont converties en unités de calcul comme suit:

La section corrigée: $S_c = L(L - \Delta L) \text{ cm}^2$

Avec:

L: Longueur de la boîte de cisaillement ($L = 60\text{mm}$);

ΔL : Déplacement horizontal (mm);

La variation de volume: $\Delta V/V$ (%);

Avec:

ΔH : Déplacement vertical (mm)

La contrainte tangentielle: τ (kPa)

Avec:

T: Force de cisaillement (daN)

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'appareillage utilisé pour l'étude du comportement des sables et des mélanges sable propre - fines. Ce dispositif est fondé sur l'utilisation de la boîte de cisaillement direct communément appelée boîte de Casagrande. Le mode opératoire suivi a été élaboré. Il permet de confectionner des échantillons homogènes et de réaliser des essais de bonne qualité. Les pertinences du dispositif et du mode opératoire ont été vérifiées par des tests de répétabilité. Il a été présenté dans ce chapitre les caractéristiques des trois types de matériaux utilisés: sable propre de Oued Chlef et les mélanges sable propre - fines de Oued Chlef et sable propre fines de Sidi Ameur. Dans le chapitre suivant nous allons étudier le comportement de ce matériau en mettant l'accent sur l'influence de quelques paramètres à l'aide des essais effectués à la boîte de cisaillement.