

IV.1. Introduction

L'étude du comportement des sols nécessite la réalisation des essais en laboratoire en utilisant des dispositifs bien instrumentés et un mode opératoire fiable. Dans ce chapitre, on présente d'abord le dispositif utilisé, il s'agit de la boîte de cisaillement direct ou boîte de Casagrande. On donne la composition de cette boîte ainsi que son dispositif expérimental et les caractéristiques du sol utilisé et des ajouts utilisés pour l'amélioration du comportement de ces matériaux. Une explication détaillée de la mise en place des échantillons est présentée.

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).

IV.2. Caractéristiques physiques du sol utilisé

Dans cette partie on détermine les caractéristiques physiques du sol utilisé ainsi que la description du matériel utilisé dans l'identification des caractéristiques physiques du sol ainsi que les résultats obtenus de cette caractérisation. Nous avons présenté les caractéristiques physiques du sable naturel d'Oued Chlef obtenus par des essais d'identification et classification des sols (figure 4.1).



Figure IV.1: Sable naturel d'Oued Chlef.

Le sol utilisé dans cette étude est le sable de Chlef qui provient des berges d'Oued de Chlef qui traverse la ville de Chlef à l'ouest d'Alger. Ce sable contient un pourcentage de limon de 5%. La figure 4.5 montre la courbe de distribution de la taille des grains (La courbe granulométrique). Le sable de Chlef est un sable moyen, subarrondi avec un diamètre moyen $D_{50} = 0.45\text{mm}$. Le limon contenu est peu plastique avec un indice de plasticité de 5.81%. Les caractéristiques physiques de ce sable sont représentées sur le tableau (4.4). Les essais ont été réalisés pour deux densités relatives

$D_r = 10\%$ et 80% représentant l'état lâche et dense respectivement. Les photos prises du sol au microscope électronique à balayage (MEB) de ce sable sont représentées sur la figure (4.2).

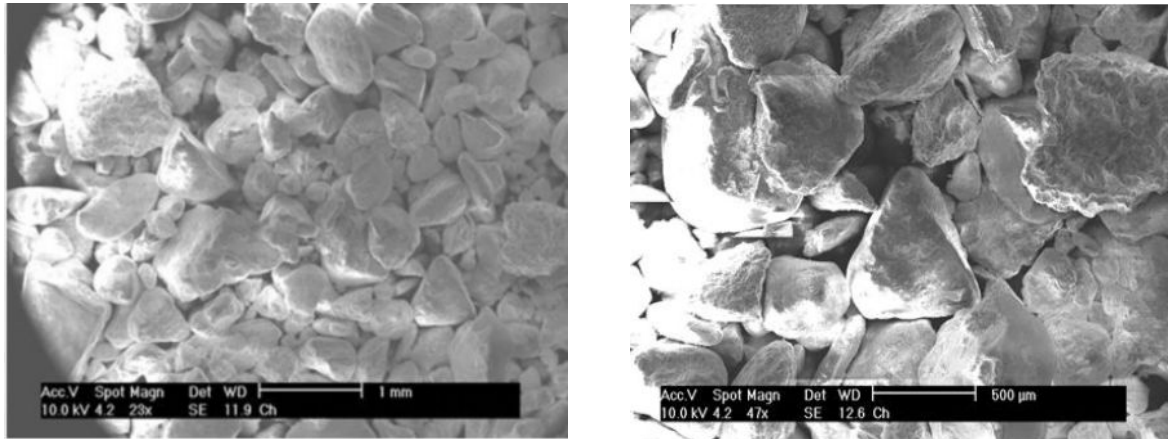


Figure IV.2: Microphotographie du sable de Chlef (Krim et al. 2016)

Les échantillons sont préparés en mélangeant le sable naturel de Chlef avec différents pourcentages de poudrettes en caoutchouc (0 - 0.5 - 1 - 1.5 et 2% de poudrettes), afin de tester l'effet de ces ajouts sur le comportement mécanique du sable.

IV.2.1. Analyse granulométrique

IV.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 $D > 80\mu\text{m}$.

IV.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.

IV.2.1.3. Matériels utilisés

Le matériel utilisé est composé de:

- Une série de tamis
- Une balance.

- Un sol de masse 500g.
- Un couvercle pour fermer les tamis.
- Un fond de tamis.
- Une tamiseuse mécanique (Figure 4.3).

2.00 – 1.25 – 1.00 – 0.650 – 0.250 – 0.125 – 0.08 – fond [mm]. (Pour le sable)

4.00 – 3.15 – 2.50 – 2.00 – 1.60 – 1.00 – fond [mm]. (Pour les poudrettes).



Les tamis



Une tamiseuse mécanique



Une balance électronique

Figure IV.3: 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.

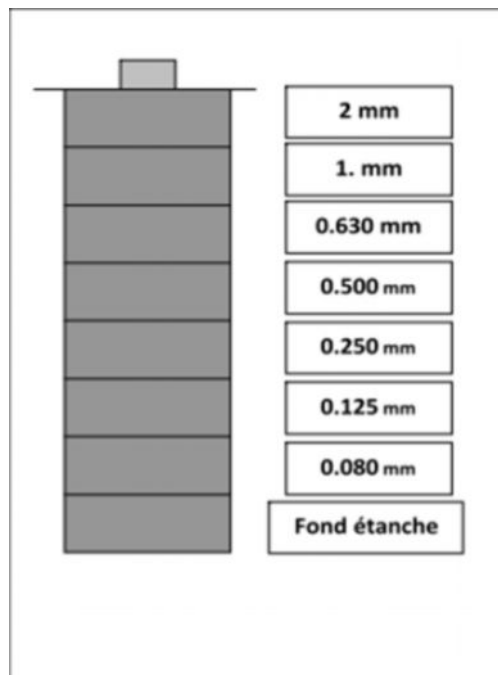


Figure IV.4: Série des tamis utilisés dans l'analyse granulométrique.

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 utilisées se suivent par une progression géométrique depuis le tamis 0.08mm jusqu'au tamis 2mm. (Figure 4.4) Pour des ouvertures inférieures à 0.063mm, 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.

IV.2.1.4. Appareillage

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

Tableau IV.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 du sable - Tamiseuse électrique - Balance électrique 	<ul style="list-style-type: none"> - Eprovettes d'essai - Eau distillée ou déminéralisée - Agitateur manuel - Densimètre - Thermomètre - Chronomètre - Une quantité d'Hexametaphosphate - Une quantité d'un échantillon « fines »

IV.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: $M \geq 0.2 D$, ou D est le plus grand diamètre de la particule en (mm), on prend pour cela une valeur de m égale à 500g ($200D \leq M \leq 600D$).

IV.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.

IV.2.1.7. Expression des résultats

Les résultats des essais granulométriques sont représentés dans la figure (4.5).

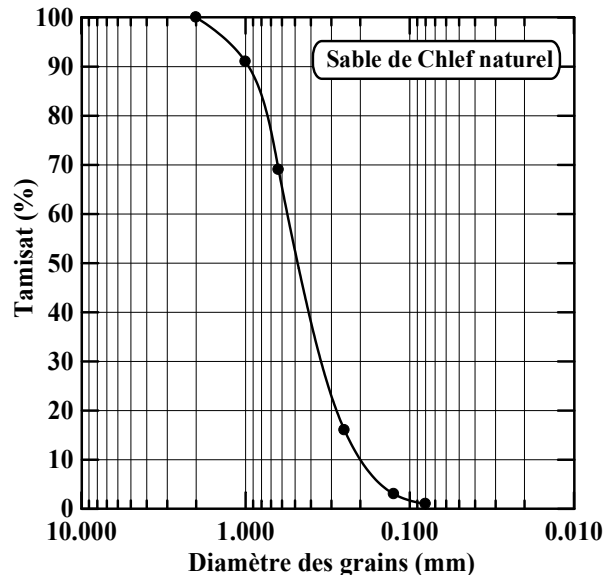


Figure IV.5: Courbe granulométrique du sable naturel d'Oued Chlef.

D_{60} : Diamètre pour lequel 60% en masse des particules constituant le sol ont un diamètre inférieur ou égale à D_{60} .

D_{30} : Diamètre pour lequel 30% en masse des particules constituant le sol ont un diamètre inférieur ou égale à D_{30} .

D_{10} : Diamètre pour lequel 10% en masse des particules constituant le sol ont un diamètre inférieur ou égale à D_{10} .

Coefficient d'uniformité ou de coefficient de Hazen: exprimé par le rapport:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Si $C_u > 2$ la granulométrie du sol est étalée ou non uniforme.

Si $C_u < 2$ la granulométrie du sol est uniforme ou serrée.

Coefficient de courbure est donnée par la formule:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60}) * (D_{10})}$$

Détermination de D_{10} , D_{30} , D_{50} et D_{60} .

D'après la courbe granulométrique du sable naturel nous pouvons déterminer.

Tableau IV.2: Différents diamètres de la courbe granulométrique du sable naturel.

Notation	Valeur en (mm)
D ₁₀	0.18
D ₃₀	0.32
D ₅₀	0.45
D ₆₀	0.54

Détermination du coefficient d'uniformité ou coefficient de Hazen (C_u):

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.54}{0.18} = 3.0$$

C_u = 3.0 > 2 ⇒ La granulométrie du sol est étalé.

Détermination du coefficient de courbure (C_c):

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60}) * (D_{10})} = \frac{(0.32)^2}{(0.54) * (0.18)} = 1.053$$

1 < C_c = 1.053 < 3 ⇒ Le sable est bien gradué.

IV.2.2. Essai au pycnomètre

IV.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.

IV.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).

IV.2.2.3. Appareillage

L'appareillage suivant est utilisé dans cet essai (figure 4.6):

- Un pycnomètre;
- Une balance de précision;

- Un flacon d'eau distillé;
- Un échantillon du sol sec;
- Un chauffage électrique.



Figure IV.6: Essai au pycnomètre.

IV.2.2.4. Exécution de l'essai

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 4.3). Le poids volumique des grains solides (γ_s) est donné par:

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

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

Tableau IV.3: Différentes masses pesées.

Notation	Masse en gramme (g)
P_1	420.46
P_2	445.20
P_3	671.41
P_4	655.90

Après calcul:

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s} = \frac{(P_2 - P_1)}{P_4 + (P_2 - P_1) - P_3} * \gamma_w = \frac{(445.20 - 420.46)}{655.90 + (445.20 - 420.46) - 671.41} * 1.0$$

$$\gamma_s = \frac{24.74}{9.23} * 1.0 = 2.68 \text{ g / cm}^3$$

IV.2.3. Détermination des indices des vides e_{\max} et e_{\min}

IV.2.3.1. Indice des vides maximal e_{\max}

C'est l'indice des vides le plus grand possible, correspondant à la compacité naturelle la plus faible, obtenu par simple déversement sous faible hauteur. On met l'échantillon de sol dans le moule à l'aide d'un entonnoir à une vitesse très lente et hauteur de chute nulle petite (ou quasi nulle), puis on pèse le moule avec l'échantillon soit M.

$$e_{\max} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{d\min}} - 1$$

IV.2.3.2. Indice des vides minimal e_{\min}

C'est l'indice des vides le plus faible, correspondant au plus grand serrage possible. Le moule est rempli en Cinq couches avec une hauteur de chute la plus grande possible. Chaque couche est compactée par 25 coups en utilisant une petite dame. On pèse le moule avec l'échantillon, soit Mt.

$$e_{\min} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{d\max}} - 1$$

e: Indice des vides du sol considéré est donné par:

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

IV.2.3.3. Indice de densité ID

C'est le degré de compacité des sols sableux donné par:

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

IV.2.3.4. Détermination de e_{\min} et e_{\max}

- Le volume de moule: $V_{\text{moule}} = 356.08 \text{ cm}^3$

- Le poids de moule vide: $M_{\text{moule}} = 672.18 \text{ grammes}$

• $e_{\min} = 0.59$

• $e_{\max} = 0.94$

Le tableau (4.4) résume les caractéristiques physiques déterminées à partir de ces essais.

Tableau IV.4: Caractéristiques physiques du sable.

e_{\min}	e_{\max}	γ_{dmin} (g/cm ³)	γ_{dmax} (g/cm ³)	γ_s (g/cm ³)	C_u	C_c	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	Forme des grains
0.59	0.94	1.34	1.73	2.68	3.0	1.053	0.18	0.45	Subarrondie

IV.3. Caractéristique des poudrettes en caoutchouc

Un pneu usé non rechappable conserve encore de nombreuses qualités, ce qui en fait une véritable matière première. Mécaniquement, les armatures du pneu doivent être souples pour lui donner une bonne déformabilité. Elles doivent par ailleurs supporter des efforts de traction importants et posséder une bonne adhérence avec le matériau de remblai. Des essais mécaniques ont été effectués par des chercheurs dans le domaine du Pneu sol sur une presse munie d'un enregistreur d'efforts de traction en fonction de la déformation sur des pneus usagés. A noter que toutes les marques de pneus, ont été testées, les résultats obtenus sont les suivants: La valeur moyenne de la résistance à la traction des bandes de roulement est de 65 kN, avec un écart type de 24 kN. La probabilité pour que toutes les bandes déroulement, aient une résistance supérieure à 26 kN est de 90%. Elle n'est que de 80% pour une résistance supérieure à 36 kN. Il n'y a pratiquement pas de différence entre les deux flancs d'un même pneu. Les résistances des flancs varient de 17 à 25 kN, selon le taux d'armatures, avec un écart type de 10 kN.

Il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 4mm et la masse spécifique ($\gamma = 1.10 \text{ g/cm}^3$). Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers. Les poudrettes sont utilisées comme charges dans des mélanges servant à produire des pièces, ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. Comme exemple d'utilisation, on a la fabrication de bandages et de roues pleines (caddie, poubelles, tondeuses, brouettes...), la modification des revêtements routiers (diminution du bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en surface). Les caractéristiques de la poudrette en caoutchouc sont présentées dans le tableau (4.5).



Figure IV.7: Vue des poudrettes en caoutchouc

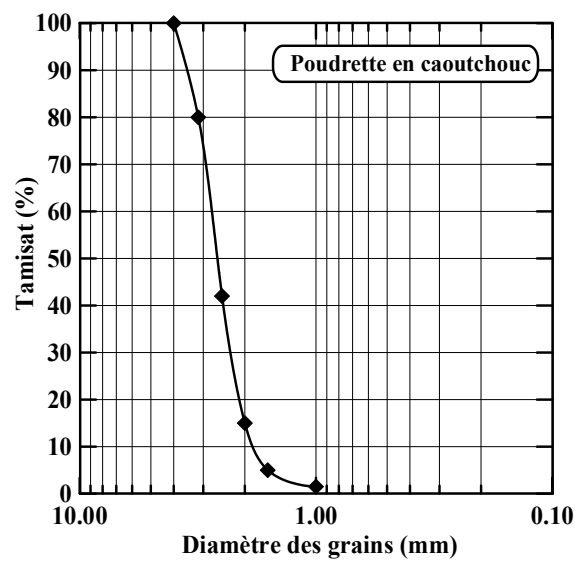


Figure IV.7: Courbe granulométrique de la poudrette

Tableau IV.5: Caractéristiques des poudrettes en caoutchouc

γ_s (g/cm ³)	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c
1.10	1.40	2.40	1.99	2.60	1.86	1.09

IV.4. Dispositif expérimental

L'essai de cisaillement 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_{rupt}) et la résistance au cisaillement effective à la rupture (τ_{rupt}).

IV.4.1. 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.

IV.4.2. 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). La boîte de Casagrande, Le bâti de consolidation sur lequel on dépose la boîte surmontée d'un étrier recevant les poids qui vont fournir la charge N (Figure 4.8).



Figure IV.8: Boîte de cisaillement utilisée.

IV.4.3. Mise en place des échantillons

Les essais ont été effectués à deux différentes densités relatives. Le premier réalisé sur un sol lâche pour une densité relative de $D_r = 10\%$ et le deuxième étant réalisé sur un sol dense pour $D_r = 80\%$. Les contraintes normales initiales appliquées au cours des essais sont respectivement: $\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa. Les échantillons préparés à différentes teneurs en poudrettes en caoutchouc (0, 0.5, 1, 1.5 et 2%), sont déposés dans la boîte de cisaillement à l'aide de la méthode de pluviation à sec.

En vue de déterminer la quantité de matériau correspondant aux différents états du sol, On calcule l'indice des vides "e" en fonction de la densité relative D_r ou l'indice de densité I_D , e_{\min} et e_{\max} selon la formule suivante:

$$e = e_{\max} - D_r * (e_{\max} - e_{\min})$$

$$\gamma_d = \frac{W_{sol}}{V_{moule}} \Rightarrow W_{sol} = \gamma_d * V_{moule}$$

Aussi on a:

$$e = \frac{V}{V_s} - 1 = \left(\frac{V * \gamma_s}{W_{sol}} \right) - 1$$

Avec:

V: est le volume de la boîte ($V = 6 \times 6 \times 2 = 72 \text{ cm}^3$)

On trouve que :

$$W_{sol} = [V * \gamma_s] / [1 + e_{\max} - D_r * (e_{\max} - e_{\min})]$$

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques physiques du sable naturel d'Oued Chlef obtenus par les essais d'identification et classification des sols et les caractéristiques des ajouts en caoutchouc utilisés dans le renforcement du sol, ainsi que l'appareillage utilisé pour l'étude du comportement mécanique du sable.

Dans le chapitre suivant, des essais de cisaillement du sol amélioré et non amélioré sera effectuée afin d'étudier le comportement du sol, en mettant l'accent sur l'influence des poudrettes en caoutchouc sur la résistance des sols à l'aide des essais effectués à la boîte de cisaillement.