

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة حسيبة بن بو علي- الشلف -Chlef  
كلية Université Hassiba Benbouali  
الهندسة المدنية و المعمارية  
Faculté de Génie Civil et d'Architecture  
قسم الهندسة المدنية  
Département de Génie-civil



**Mémoire de Master**  
**Filière: Génie Civil**  
**Spécialité: Géotechnique**

*Thème*

**Contribution à l'étude de la forme des particules sur la caractérisation  
mécanique des mélanges sable-granulés de caoutchouc**

Présenté par :

- MOHAMED ABDELLAHI Dah
- MOHAMED VADEL CHEIKH Boheye

Dirigé par:

- Pr. BELKHATIR Mostefa

Promotion : 2023/2024

## *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné la santé et la volonté d'entamer et de déterminer ce mémoire.*

*Nous tenons à exprimer notre hommage et notre profonde et sincère gratitude à notre encadreur le professeur **MOSTAPHA BELKHATIR** qui Nous avons fait l'honneur de diriger ce travail de recherche.*

*Nous tenons à lui exprimer notre gratitude et profond respect.*

*et je voudrais aussi remercier*

*les docteurs **MAHMOUDI YUCEF**, **Cherif Taiba Abdellah** et le doctorant **Megrouse Mohamed** qui m'ont également fait l'honneur de guider ce travail, collaboré à son enrichissement par ses directions judicieuses et son soutien constant.*

*Nous voudrions également adresser nos plus vifs remerciements au président et aux membres du jury qui nous aurons honorés en acceptant d'examiner ce modeste travail.*

*Nous tenons également à remercier tous le staff administratif, les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.*

# *Dédicace 1*

À chaque étape importante d'achever de notre vie, il convient de faire une pause pour regarder en arrière et se rappeler toutes ces personnes avec lesquelles nous avons passé tous ces bons moments de notre parcours, mais aussi les mauvais.

Ces personnes qui nous ont aidées sans jamais rien attendre au retour, soutenues sans réserve, aimées sans compter, ces personnes pour qui notre bonheur, notre réussite comptaient énormément, pour qui un malheur en nous, en eux se transforme en  
pleur.

Je dédie ce modeste travail à toutes ma famille et précisément mes chers parents, qui ont consacré leur existence à bâtir la mienne, pour leur soutien, patience et soucis de tendresse et d'affection pour tout ce que ils ont fait pour que je puisse arriver à ce  
stade.

A ma chère tante « OUKHT EL BENINE HENNOUNE »

A mes très chères oncles « SIDI MOHAMED et MOHAMED SALEM » et mes très chers frères et sœurs qui ont toujours été à mes côtés.

Et à toute personne que j'ai connue et que j'ai aimée.

Le long de ma vie, J'ai été entouré de personnes qui m'ont donné le meilleur d'eux même, je crois qu'aujourd'hui il est le temps de leur dédiés du fond du Cœur ce modeste travail a tous mes frères promotion étranger au Chlef, La liste est assez longue, je vous remercie pour tous les sentiments d'amitié que vous avez envers moi et dont je suis fier.

**MOUHAMED ABDELLAHI DAH**

# *Dédicace 2*

En mémoire affectueuse de mon père Cheikh Boheye, dont le sacrifice inébranlable et le soutien sans limite ont pavé le chemin de mon parcours éducatif. Sa dévotion sans faille a été la pierre angulaire de mon succès, et même s'il n'est plus parmi nous, son esprit continue de me guider et de m'inspirer.

À ma chère mère Mariem Moulay Hachem, qui a été le pilier de force de notre famille, son amour et sa résilience alimentant ma détermination à exceller. Vos sacrifices n'ont pas été ignorés, et je porte vos leçons avec moi à chaque étape.

À mes sœurs Toutou, Khadi et Ilham et mes frères Mohamed El Hafed , dont l'encouragement et la foi inébranlable en mes capacités ont été ma source constante de motivation. Votre présence dans ma vie est un cadeau inestimable, et je suis infiniment reconnaissant pour votre soutien.

À mon cousin et mon frère Cheikh Sidi Boheye , pour son soutien indéfectible et son encouragements tout au long de mon parcours. Votre croyance en mon potentiel a été une lumière guidresse pendant les moments difficiles, et je vous suis éternellement reconnaissant pour votre présence dans ma vie.

À ma tante Khadjetou, dont la sagesse et les conseils ont été une source de force et d'inspiration. Votre foi en mes capacités a été une force motrice, et je vous suis profondément reconnaissant pour votre amour et votre soutien.

À mes frères, Seydna Ali El Wavi et Hadrami Sidi Chrif, dont leur sagesse et leur soutien ont été une source d'inspiration et de force pendant mon cheminement académique. Votre encouragement a été d'une valeur inestimable, et je vous dédie ce travail avec gratitude et respect.

Ce rapport est dédié à chacun de vous, pour votre amour infini, vos sacrifices et votre foi en mes rêves et pour tous ceux qui se soucient de moi.

**MOHAMED VADEL CHEIKH BOHEYE**

# SOMMAIRE

ABSTRACT.....	I
RESUME .....	II
ملخص.....	III
LISTES DES SYMBOLES.....	IV
Introduction générale.....	1

## Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.1	Introduction .....	5
1.2	Généralités sur la forme des particules et granules de caoutchouc et leurs effets sur la réponse mécanique des sols.....	6
1.3	Paramètres de résistance au cisaillement .....	14
1.4	Impact de la Teneur en Caoutchouc Granulé sur l'Angle de Frottement Maximum : .....	17
1.5	Effet de quelques facteurs sur la réponse mécanique des sols : .....	20
1.5.1	Tailles des grains.....	20
1.5.2	Influence de la méthode de déposition sur le comportement mécanique des sols.....	22
1.5.3	Influence de la teneur en fibres .....	24
1.5.4	Influence des cendres volantes.....	26
1.6	Conclusion.....	27

## Chapitre 2 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PROCEDURE DE L'ESSAI

2.1	Introduction.....	28
2.2	Dispositif expérimental.....	28
2.2.1	Introduction .....	28
2.2.2	But de l'essai .....	29
2.2.3	Appareillage.....	29
2.2.4	Principe de l'essai de cisaillement.....	30
2.2.5	Détermination des caractéristiques intrinsèques de sols.....	31
2.3	Matériaux testés .....	31
2.4	Procédure de l'essai .....	36
2.4.1	Introduction .....	36

2.4.2 Reconstitution de l'échantillon.....	36
2.4.3 Mise en place de l'échantillon dans la boîte .....	39
2.4.4 Mise en place de la boîte sur la machine.....	39
2.4.5 Lectures .....	39
2.5. Conclusion .....	<b>39</b>

### **Chapitre 3 : EFFET DE TENEUR EN GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPONSE MECANIQUE DES SOLS SABLEUX**

3.1. Introduction.....	<b>42</b>
3.2. Résultats des essais réalisés .....	<b>42</b>
3.2.1. Mélanges sable de Chlef-granules de caoutchouc.....	43
3.2.2. Mélanges sable de concassé-granules de caoutchouc .....	45
3.2.3. Mélanges sable de dune-granules de caoutchouc.....	48
3.3. Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement maximale .....	<b>51</b>
3.4. Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement normalisée .....	<b>53</b>
3.5. Effet de la teneur en granules de caoutchouc sur l'angle de frottement .....	<b>55</b>
3.6. Conclusion .....	<b>57</b>

### **Chapitre 4 : EFFET DE LA FORME DES PARTICULES SUR LA CARACTERISATION MECANIQUE DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC**

4.1. Introduction.....	60
4.2. Résultats des essais réalisés .....	61
4.2.1 Contrainte normale initiale faible, $\sigma_n=100$ kPa .....	61
4.2.2 Contrainte normale initiale moyenne, $\sigma_n=200$ kPa.....	65
4.2.3 Contrainte normale initiale élevée, $\sigma_n=400$ kPa .....	69
4.3. Effet de la forme des grains sur la résistance au cisaillement maximale des mélanges sable- granulés de caoutchouc .....	73
4.4. Effet de la forme des grains sur l'angle de frottement de différents mélanges .....	76
4.5 Conclusion .....	78

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre 1 : Etude bibliographique

<b>Figure 1.1:</b> Variation de l'angle de frottement $\phi$ l'état critique avec rondeur combiné des sols mixtes (Yang et Wei 2012).	6
<b>Figure 1.2:</b> Corrélation de paramètre (M) en fonction des caractéristiques de forme des particules. (a) Rapport d'aspect, (b) Sphéricité, (c) Convexité et (d) Régularité globale (Yang et Luo 2015).	7
<b>Figure 1.3 :</b> Réponse non-drainée du mélange sable-limon ( $P'_c=100$ kPa, $Dr=52\%$ ) (a)-Évolution de déviateur de contrainte (b)- Chemin de contrainte dans le plan ( $p'$ , $q$ ) (Cherif Taiba 2017).	8
<b>Figure 1.4 :</b> (a) Variations du rapport de déviateur au pic et la déformation axiale au pic avec la pression de confinement et la régularité globale des mélanges. (Xiao et al.2019).	9
<b>Figure 1.5:</b> Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique des mélanges sable-biochar ( $\sigma_n=100$ kPa, $Dr=90$ %, $F_{bio}=0$ %) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b) Evolution de déplacement vertical. (Ali Taleb et Adda.2023)	11
<b>Figure 1.6:</b> Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique des mélanges sable-biochar ( $\sigma_n=200$ kPa, $Dr=90$ %, $F_{bio}=0$ %) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b) Evolution de déplacement vertical. (Ali Taleb et Adda.2023)	12
<b>Figure 1.7:</b> Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique des mélanges sable-biochar ( $\sigma_n=300$ kPa, $Dr=90$ %, $F_{bio}=0$ %) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b) Evolution de déplacement vertical. (Ali Taleb et Adda.2023)	14
<b>Figure 1.8:</b> (a) Variations de l'angle de frottement interne avec la teneur en caoutchouc granulé à diverses densités relatives, et (b) enveloppes de contrainte de cisaillement pour des spécimens avec différentes teneurs en caoutchouc granulé ( $Dr = 50\%$ ). (Anvari et al. 2017)	15
<b>Figure 1.9:</b> Variation de l'angle de frottement ( $\phi$ ) du sable en fonction de la teneur en copeaux de pneus. (Aksoy et al. 2021)	16
<b>Figure 1.10:</b> Angle de frottement maximum en fonction de la teneur en caoutchouc granulé. (Sung et al. 2022)	18
<b>Figure 1.11:</b> Une comparaison de (a) l'angle de frottement à l'état critique et (b) le coefficient de dilatance à diverses teneurs en caoutchouc. (Daghistani et al. 2023)	20
<b>Figure 1.12:</b> Exemples des courbes granulométriques des sols (Pecker. (1984).)	21
<b>Figure 1.13 :</b> Influence des caractéristiques granulométriques ( $D_{10}$ , $D_{50}$ , ESR, MGSR) sur la pression interstitielle d'un sable limoneux . (Belkhatir et al. (2014))	22

<b>Figure 1.14 :</b> Influence du mode de préparation sur la résistance au cisaillement non drainée. (Mulilis et al. (1977) .....	23
<b>Figure 1.15:</b> Influence de la méthode de déposition sur la réponse non drainée du sol de Chlef, (a) courbe de cisaillement, (b) chemin de contrainte, (Della et al., (2011)).....	24
<b>Figure 1.16:</b> Courbe de compactage d'un sol renforcé de fibre de verre (Sujatha et al (2018).....	25
<b>Figure 1.17:</b> Comportement mécanique des mélanges sable de dune –fibres (a)-Dr=50%, (b)-Dr=92% (Nahar et Messaadia (2022) .....	26
<b>Figure 1.18 :</b> Influence de teneur en cendres volantes sur la résistance au cisaillement non drainée des sols granulaires. (Kermatikerman et al. (2018) .....	27

## **Chapitre 2 : Dispositif expérimental et procédure de l'essai**

<b>Figure 2.1 :</b> Machine de cisaillement direct à la boîte de casagrande .(laboratoire de mécanique des sols de l'université Hassiba Ben Bouali de Chlef, Algérie).....	28
<b>Figure 2.2 :</b> appareillage .....	29
<b>Figure 2.3 :</b> Principe de l'essai de cisaillement direct, (figure d'après NFP94-071-1). .....	30
<b>Figure 2.4 :</b> La courbe intrinsèque des sols. Figure d'après NFP94-071-1 .....	31
<b>Figure 2.5 :</b> Les matériaux utilisées dans cette étude expérimental a) sable chlef b) sable concasser c) sable dune d) granulats de caoutchouc. ....	32
<b>Figure 2.6:</b> Courbes granulométriques des matériaux testés a) sable dune ,b) sable concasser ,c) sable chlef. ....	33
<b>Figure 2.7:</b> Variation des indices des vides en fonction teneur en caoutchouc.....	34
<b>Figure 2.8:</b> illustre la procédure de préparation des échantillons. ....	37

## **Chapitre 3 : Effet de teneur en granules de caoutchouc sur la réponse mécanique des sols sableux**

<b>Figure 3.1 :</b> Comportement mécanique des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc; ( $\sigma_n=100$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement , b) Evolution de déplacement vertical .....	44
<b>Figure 3.2:</b> Comportement mécanique des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc; ( $\sigma_n=200$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement , b) Evolution de déplacement vertical .....	45

<b>Figure 3.3:</b> Comportement mécanique des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc; ( $\sigma_n=400$ kPa), a) Evolution de la contrainte de cisaillement , b) Evolution de déplacement vertical .....	45
<b>Figure 3.4:</b> Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;( $\sigma_n=100$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement ,b) Evolution de déplacement vertical .....	47
<b>Figure 3.5:</b> Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;( $\sigma_n=200$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement ,b) Evolution de déplacement vertical .....	47
<b>Figure 3.6:</b> Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;( $\sigma_n=400$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical .....	48
<b>Figure 3.7:</b> Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;( $\sigma_n=100$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical .....	50
<b>Figure 3.8:</b> Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;( $\sigma_n=200$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical .....	50
<b>Figure 3.9:</b> Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;( $\sigma_n=400$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical .....	51
<b>Figure 3.10:</b> Résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte normale initiale ...	53
<b>Figure 3.11:</b> Impact de la teneur en granulés de caoutchouc sur résistance au cisaillement normalisée ( $\tau/\sigma_n$ ) des mélanges étudiés.....	54
<b>Figure 3.12 :</b> Angle de frottement en fonction de teneur en granulés de caoutchouc pour les matériaux étudiés. ....	56

## **Chapitre 4 : Effet de la forme des particules sur la caractérisation mécanique des mélanges sable-granules de caoutchouc**

<b>Figure 4.1:</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=0\%,\sigma_n=100$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	62
<b>Figure 4.2:</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=2.5\%,\sigma_n=100$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	63
<b>Figure 4.3:</b> : Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=5\%,\sigma_n=100$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	63

<b>Figure 4.4:</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=7.5\%$ , $\sigma_n=100$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	64
<b>Figure 4.5:</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=10\%$ , $\sigma_n=200$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	65
<b>Figure 4.6:</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=0\%$ , $\sigma_n=200$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	66
<b>Figure 4.7:</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=2.5\%$ , $\sigma_n=200$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	67
<b>Figure 4.8:</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=5\%$ , $\sigma_n=200$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	67
<b>Figure 4.9:</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=7.5\%$ , $\sigma_n=200$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	68
<b>Figure 4.10 :</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=10\%$ , $\sigma_n=200$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	68
<b>Figure 4.11:</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=0\%$ , $\sigma_n=400$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	70
<b>Figure 4.12:</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=2.5\%$ , $\sigma_n=400$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	71
<b>Figure 4.13 :</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=5\%$ , $\sigma_n=400$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	71
<b>Figure 4.14 :</b> Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=7.5\%$ , $\sigma_n=400$ kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....	72

**Figure 4.15:** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=10\%$ ,  $\sigma_n=400$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical.....73

Figure 4.16: Effet de la forme des particules sur la résistance au cisaillement maximale .....76

Figure 4.17: Effet de la forme des grains sur l'angle de frottement .....77

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre 1 : Etude bibliographique

<b>Tableau 1.1</b> : le pourcentage optimal de copeaux de pneus pour augmenter le $(\phi)$ du sable trouvé par certains chercheurs.....	16
---	----

## Chapitre 2 : Dispositif expérimental et procédure de l'essai

<b>Tableau 2.1</b> : Propriétés physiques des matériaux testés.....	34
<b>Table 2.2</b> : Les masses calculées pour les mélanges préparés par pluviation à sec .....	38

## Chapitre 3 : Effet de teneur en granules de caoutchouc sur la réponse mécanique des sols sableux

<b>Table 3.1</b> : Coefficients A, B, C et R2 pour équation (3.1) .....	57
---	----

## ABSTRACT

Recycled rubber granules have been utilized in various geotechnical engineering applications such as retaining walls, slope reinforcement, backfilling, and landfilling to get benefit from their significant vibration damping effects. However, due to the nature of rubber particles characteristics, soil structures may exhibit issues regarding strength and deformation behavior. In this context, the present study proposes an experimental investigation on the influence of particle shape on the mechanical response of sands mixed with rubber particles ( $R_c=0\%$ , 2.5%, 5%, 7.5%, and 10%). Additionally, an experimental protocol is implemented using the Casagrande shear box device to understand the behavior of this material and confirm the existence of eventual potential correlations between particle shape characteristics and maximum shear resistance of the studied mixtures, as well as the evaluation of relationships between particle shape and the internal friction angle of sand-rubber granules mixtures. The results of direct shear tests clearly demonstrate that the grain shape parameter significantly controls the shear resistance response of sand-rubber granules mixtures. Specifically, the mixture of crushed sand-rubber granules exhibits higher shear resistance than that of the other two mixtures, namely the Chlef sand-rubber granules mixtures and the dune sand-rubber granules mixtures. Moreover, the obtained results indicate that the incorporation of rubber granules has a significant impact on the mechanical properties of sandy soils. It is found that the maximum shear resistance increases proportionally with the added quantity of rubber granules, reaching a significant threshold for an  $R_c=5\%$  proportion in the studied mixtures. However, beyond this threshold, the inverse trend is observed for all examined samples. Considering all the tested parameters, it's possible to establish a polynomial relationship between the friction angle and the proportion of rubber granules content, thereby offering a meaningful correlation between these two variables.

**KEYWORDS:** granular soil, rubber granules content, Casagrande box device, particle shape, mechanical properties

## RESUME

Les granulés de caoutchouc recyclés ont été utilisés dans diverses applications d'ingénierie géotechnique, telles que le mur de soutènement, le renforcement de la pente, le remblayage et la décharge pour bénéficier de leurs caractéristiques de réduction des vibrations significative. Cependant, en raison de la nature des particules de caoutchouc, les structures du sol peuvent avoir des problèmes en termes de résistance et de comportement de déformation. Dans ce contexte, cette étude propose une investigation expérimentale sur l'influence de la forme des particules sur la réponse mécanique des sables mélangés avec les granules de caoutchouc ( $R_c=0\%$ ,  $2.5\%$ ,  $5\%$ ,  $7.5\%$  et  $10\%$ ). De plus, un protocole expérimental est mis en œuvre en utilisant la boîte de cisaillement de Casagrande pour comprendre le comportement de ce matériau composite et confirmer l'existence d'éventuelles corrélations entre la forme des particules et la résistance au cisaillement maximale des mélanges étudiés ainsi que l'évaluation des relations entre la forme des particules et l'angle de frottement interne des mélanges sable- granules de caoutchouc. Les résultats des essais de cisaillement direct démontrent clairement que le paramètre de la forme des grains exerce un contrôle significatif sur la réponse de la résistance au cisaillement des mélanges sable-granulés de caoutchouc. En particulier, le mélange de sable concassé -granulés de caoutchouc présente une résistance au cisaillement plus élevée que celle des deux autres mélanges, à savoir le mélange de sable de Chlef -granulés de caoutchouc, ainsi que le mélange de sable de dune-granulés de caoutchouc. De plus, les résultats des essais menés sur divers mélanges indiquent que l'incorporation de granulés de caoutchouc a un impact significatif sur les propriétés mécaniques des sols sableux. Il est également observé que la résistance maximale au cisaillement augmente proportionnellement à la quantité de granulés de caoutchouc ajoutée, atteignant un seuil significatif pour une proportion de  $R_c=5\%$  dans les mélanges étudiés. Cependant, au-delà de ce seuil, une tendance inverse est constatée pour tous les échantillons examinés. De plus, en tenant compte de tous les paramètres examinés, il est possible d'établir une relation polynomiale entre l'angle de frottement et la proportion de granulés de caoutchouc, offrant ainsi une corrélation significative entre ces deux variables.

**MOTS CLES :** Sol granulaire, granules de caoutchouc, boîte de Casagrande, forme des particules, propriétés mécaniques

## ملخص

تم استخدام حبيبات المطاط المعاد تدويرها في مختلف التطبيقات الهندسية الجيوتقنية مثل الجدران الحائزة، وتعزيز المنحدرات، والحشو، والتخلص من النفايات للاستفادة من تأثيراتها الكبيرة في تخفيف الاهتزازات. ومع ذلك، بسبب طبيعة خصائص جزيئات المطاط، قد تظهر هياكل التربة مشاكل فيما يتعلق بقوة وسلوك الانحناء. في هذا السياق، تقترح هذه الدراسة تحقيق تجريبي حول تأثير شكل الجسيمات على الاستجابة الميكانيكية للرمال المخلوطة بجزيئات المطاط ( $R_c = 0$ ، 5٪، 2.5٪، 5٪، 5.7٪، و 10٪). بالإضافة إلى ذلك، يتم تنفيذ بروتوكول تجريبي باستخدام جهاز صندوق القص كاساجراندي لفهم سلوك هذا المواد وتأكيد وجود علاقات محتملة بين خصائص شكل الجسيمات وأقصى مقاومة للقص للخلائط المدروسة، بالإضافة إلى تقييم العلاقات بين شكل الجسيمات وزاوية الاحتكاك الداخلية لخلائط الرمل وحبيبات المطاط. تظهر نتائج اختبار القص المباشر بوضوح أن معامل شكل الحبيبات يتحكم بشكل كبير في استجابة مقاومة القص لخلائط الرمل وحبيبات المطاط. على وجه الخصوص، تظهر الخليط المكون من رمل محطم وحبيبات مطاطية مقاومة قص أعلى من ذلك في الخلائط الأخرى الاثنين، وهي خلائط رمل الشلف وحبيبات المطاط وخلائط رمل الكثبان وحبيبات المطاط. علاوة على ذلك، تشير النتائج المحصل عليها إلى أن إدخال حبيبات المطاط له تأثير كبير على الخصائص الميكانيكية للتربة الرملية. تم العثور على أن أقصى مقاومة للقص تزيد بشكل نسبي مع كمية الحبيبات المطاطية المضافة، وتصل إلى عتبة هامة لنسبة  $R_c = 5$ ٪ في الخلائط المدروسة. ومع ذلك، بعد هذه العتبة، يُلاحظ الاتجاه المعاكس لجميع العينات المفحوصة. باعتبار جميع المعلمات المختبرة، يُمكن إنشاء علاقة دالة بين زاوية الاحتكاك ونسبة محتوى حبيبات المطاط، مما يقدم علاقة ذات مغزى بين هاتين المتغيرتين.

الكلمات الرئيسية: تربة حبيبية، محتوى حبيبات المطاط، جهاز صندوق القص كاساجراندي، خصائص شكل الجسيمات، الخصائص الميكانيكية

## LISTES DES SYMBOLES

<b>A</b>	Surface corrigée de la section cisailée (mm <sup>2</sup> )
<b>C</b>	Cohésion
<b>Cc</b>	Coefficient de Courbure, $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10} \cdot D_{60})$
<b>Cu</b>	Coefficient d'uniformité, $Cu = D_{60}/D_{10}$
<b>D<sub>10</sub></b>	Diamètre des grains correspondant à 10% de passant (mm)
<b>D<sub>30</sub></b>	Diamètre des grains correspondant à 30% de passant(mm)
<b>D<sub>60</sub></b>	Diamètre des grains correspondant à 60% de passant(mm)
<b>Dr</b>	Densité relative
<b>e</b>	Indice des vides
<b>e<sub>max</sub></b>	Indice des vides maximal
<b>e<sub>min</sub></b>	Indice des vides minimal
<b>M<sub>SA</sub></b>	Masse du sable(g)
<b>RC</b>	Teneur en caoutchouc %
<b>V<sub>T</sub></b>	Volume total (mm <sup>3</sup> )
<b>V<sub>moule</sub></b>	Volume du moule en mm
<b>W<sub>sol</sub></b>	Poids volumique du sol
<b>γ<sub>s</sub></b>	Poids volumique des grains solide (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Δh</b>	Déplacement horizontal(mm)

$\Delta v$	Déplacement vertical(mm)
$\sigma_N$	Contrainte normale (MPa)
$\tau$	Contrainte de cisaillement (kPa)
$\tau_{max}$	Contrainte de cisaillement maximale (kPa)
<b>T</b>	Effort tangentiel
<b>a,b,c</b>	Coefficients de l'équation
<b>R<sup>2</sup></b>	Coefficient de détermination
$\gamma_d$	Poid volumique sec (g/cm <sup>3</sup> )
$\frac{\tau}{\sigma_n}$	Résistance au cisaillement normalisée
$\Phi$	Angle de frottement

# **INTRODUCTION GENERALE**

### Introduction générale

La stabilité des sols granulaires constitue un enjeu crucial dans le domaine de l'ingénierie civile, notamment en géotechnique, car elle influe directement sur la capacité portante et la durabilité des structures construites. Cette problématique nécessite une analyse approfondie des propriétés physico-mécaniques des sols afin de comprendre et de prédire leur comportement sous différentes contraintes et conditions environnementales. Pour étudier la réponse mécanique des matériaux granulaires, des approches expérimentales et numériques sont souvent utilisées. Ces méthodes permettent d'évaluer les caractéristiques de résistance, de déformation et de perméabilité des sols dans des conditions contrôlées en laboratoire ou sur le terrain. Ces dernières années, un intérêt croissant s'est porté sur l'amélioration des propriétés des sols granulaires en introduisant des matériaux renforçant, tels que les granulats de caoutchouc, pour augmenter leur résistance au cisaillement et leur capacité de charge. Cependant, malgré les avancées dans ce domaine, les granules de caoutchouc demeurent relativement peu étudiés en géotechnique. Leur impact sur la stabilité et le comportement mécanique des sols granulaires reste donc un sujet de recherche prometteur et pertinent. En particulier, l'effet de la forme des particules, ainsi que la proportion et la distribution des granulats de caoutchouc dans les mélanges sable-granules de caoutchouc, méritent une attention particulière pour mieux comprendre leur influence sur la réponse mécanique des sols.

L'objectif de cette étude expérimentale consiste à évaluer l'influence de la forme des particules du sable sur la résistance au cisaillement des mélanges sable-granules de caoutchouc, en utilisant la boîte de Casagrande pour les essais de cisaillement direct. Trois types de sables présentant des formes de particules différentes, à savoir le sable de Chlef, le sable de dune et le sable concassé, ont été mélangés avec diverses proportions de granules de caoutchouc (RC = 0 %, 2.5 %, 5 %, 7.5 % et 10 %). Ces mélanges ont été reconstitués à une densité relative dense ( $D_r = 90$  %) et soumis à différentes contraintes normales (100 kPa, 200 kPa et 400 kPa).

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux.

Le premier chapitre offre une revue approfondie de la littérature sur l'incidence de la teneur en granules de caoutchouc et la forme des particules sur le comportement mécanique des sols, tout en examinant l'effet de divers paramètres sur la réponse mécanique des sols granulaires.

## **Introduction générale**

---

Le deuxième chapitre expose en détail le dispositif expérimental employé dans cette étude, la méthodologie des essais de cisaillement et la caractérisation physique des matériaux utilisés.

Le troisième chapitre détaille les conclusions des essais de cisaillement effectués pour analyser l'effet de la teneur en granules de caoutchouc et de la contrainte normale initiale sur la réponse mécanique des trois types de sable étudiés.

Enfin, le quatrième chapitre présente les résultats des essais de cisaillement visant à évaluer l'impact de la forme des particules sur la résistance au cisaillement des mélanges sable-granules de caoutchouc.

# **CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

### 1.1 Introduction

L'étude de l'incidence de la teneur en granules de caoutchouc et la forme des particules sur le comportement mécanique des sols granulaires constitue un domaine de recherche crucial dans le domaine de la géotechnique et des matériaux de construction. Cette revue de littérature vise à explorer en profondeur comment ces facteurs influencent la réponse mécanique des sols, tout en examinant l'impact de divers paramètres sur cette dynamique.

Les granules de caoutchouc, issus de pneus recyclés, sont souvent utilisés pour améliorer les propriétés géotechniques des sols, notamment leur capacité de charge, leur résilience et leur comportement face aux contraintes mécaniques. La teneur en granules de caoutchouc dans un sol peut modifier significativement sa compressibilité, sa résistance au cisaillement et sa capacité de drainage, entre autres aspects. De plus, la forme des particules de caoutchouc, qu'elle soit sphérique, irrégulière ou fragmentée, influence également ces propriétés.

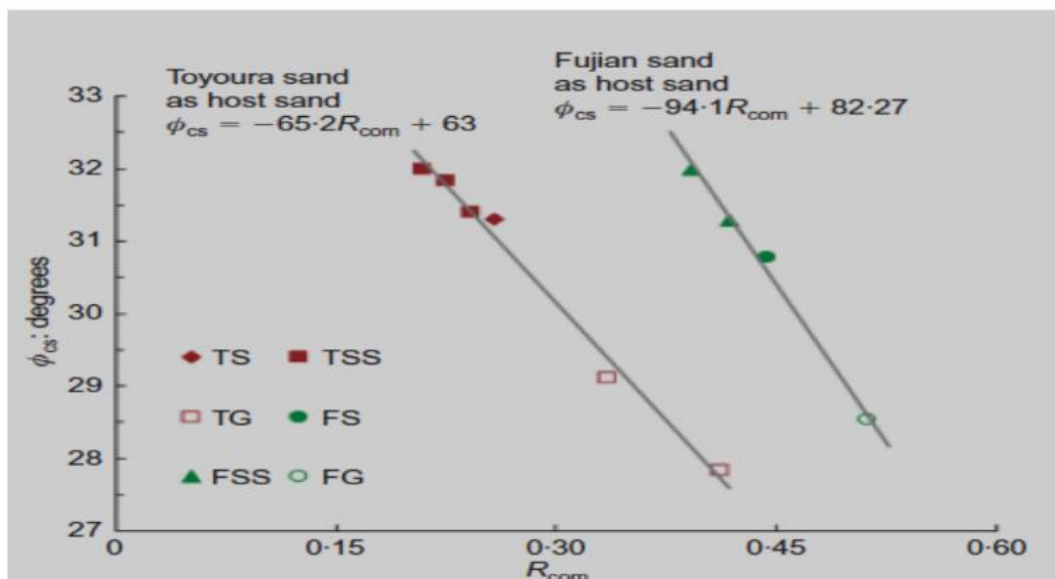
Plusieurs études ont exploré comment la variation de la teneur en granules de caoutchouc modifie la réponse mécanique des sols granulaires. Des recherches ont montré que l'augmentation de la teneur en granules de caoutchouc peut améliorer la résilience du sol aux charges dynamiques, réduire le tassement et augmenter la capacité de déformation sans rupture. Cependant, des teneurs élevées peuvent également affecter négativement la stabilité à long terme du sol.

Parallèlement, la forme de particules du sable joue un rôle crucial dans la manière dont elles interagissent avec la matrice de sol. Les particules sphériques peuvent mieux se compacter et répartir les contraintes, tandis que les particules irrégulières peuvent améliorer l'adhérence à la matrice du sol. Ces variations influencent directement la résistance au cisaillement, la perméabilité et d'autres propriétés mécaniques des sols granulaires.

Ainsi, cette revue de littérature vise à synthétiser les connaissances actuelles sur l'incidence de la teneur en granules de caoutchouc et la forme des particules sur le comportement mécanique des sols, tout en mettant en lumière les défis et les opportunités pour l'avenir de ce domaine de recherche essentiel.

## 1.2 Généralités sur la forme des particules et granules de caoutchouc et leurs effets sur la réponse mécanique des sols

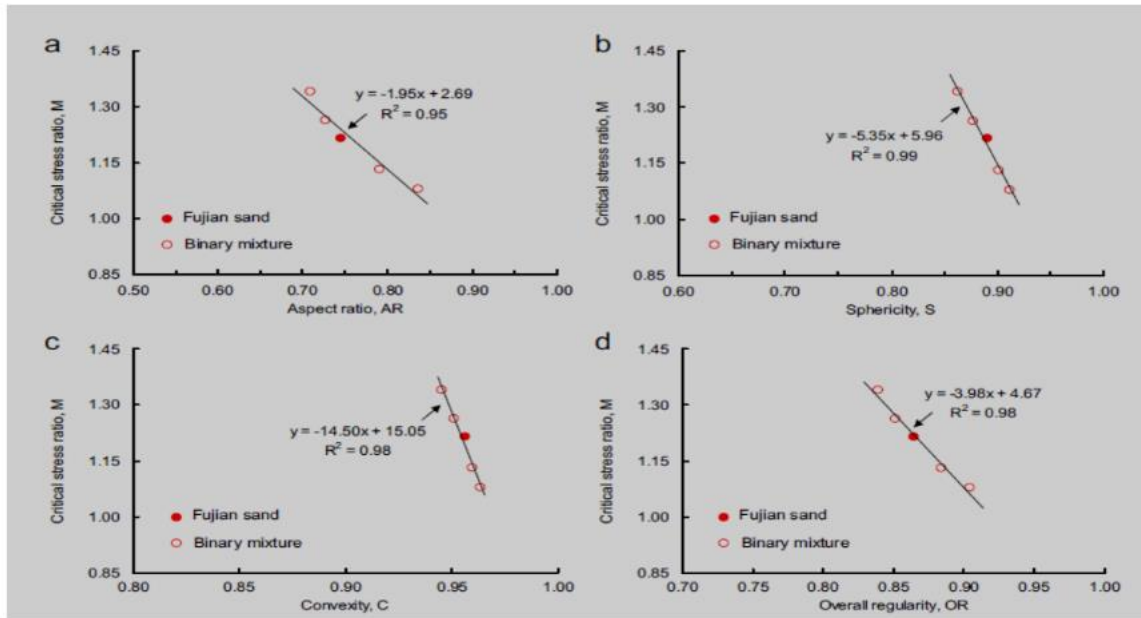
Yang et Wei (2012) ont réalisé une série d'essais triaxiaux non-drainés sur quatre mélanges binaires composés de deux types de sables de quartz purs et de deux types de fines non plastiques, chacune ayant des particules de formes différentes (silice concassée angulaire et billes de verre arrondies), avec l'ajout de quantités variables de ces fines. Les résultats ont révélé que l'incorporation de fines arrondies aux sables de quartz a entraîné une diminution significative de l'angle de frottement à l'état critique. En revanche, l'ajout de fines angulaires a légèrement augmenté l'angle de frottement à l'état critique. De plus, les mélanges binaires contenant des fines arrondies ont montré une plus grande sensibilité à l'effondrement que ceux contenant des fines angulaires pour un contenu équivalent (voir Figure 1.1).



**Figure 1.1:** Variation de l'angle de frottement  $\phi$  l'état critique avec rondeur combiné des sols mixtes (Yang et Wei 2012).

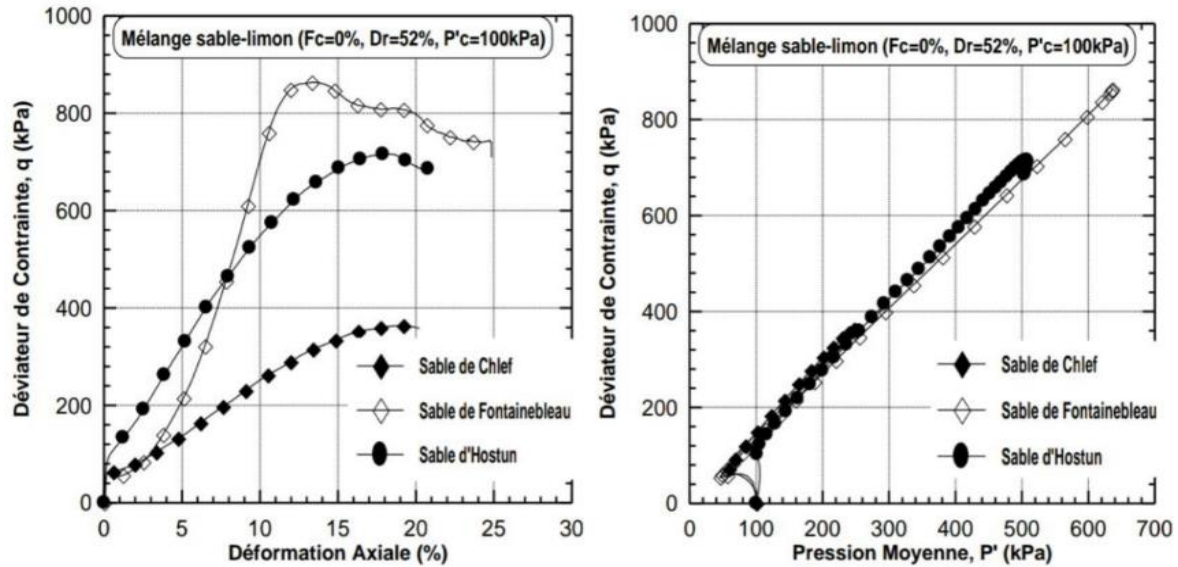
Yang et Luo (2015) ont entrepris des essais triaxiaux sur le sable de Fujian mélangé à différentes proportions de fines afin d'examiner l'influence des caractéristiques de forme des particules (telles que le rapport d'aspect, la sphéricité, la convexité et la régularité globale) sur le comportement mécanique des mélanges binaires. Leurs résultats ont révélé une corrélation

significative entre les paramètres de forme des particules et le rapport de l'état critique (M) des mélanges étudiés, comme le montre la Figure 1.2.



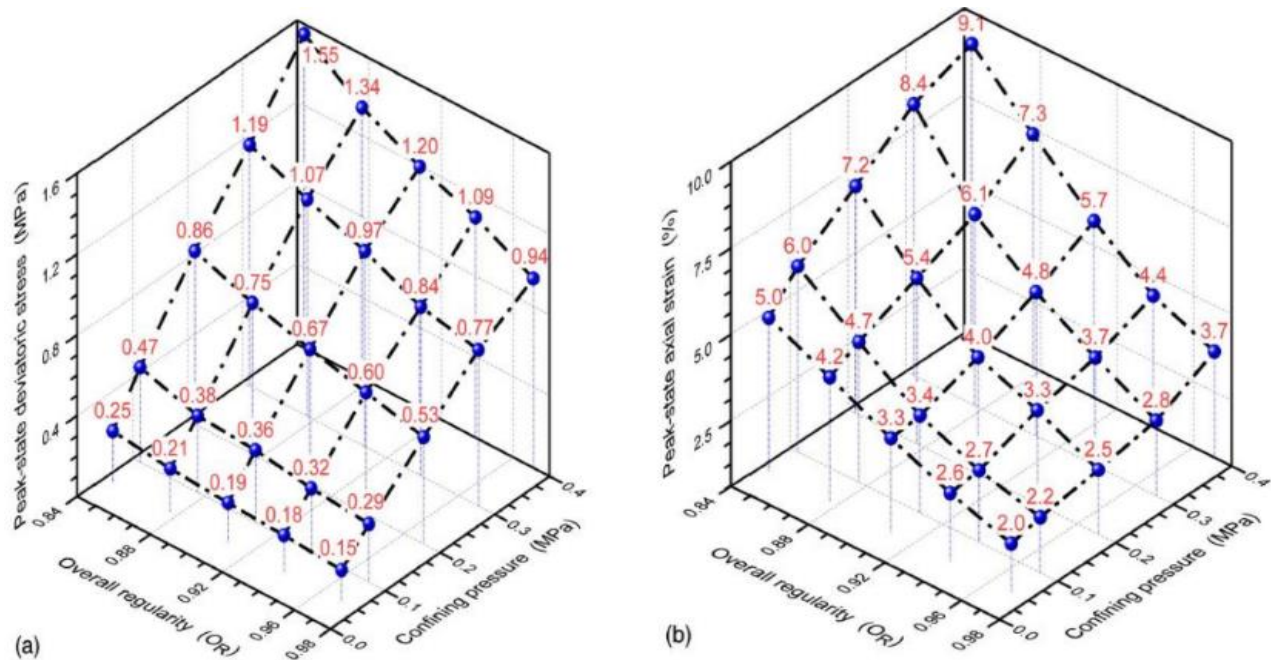
**Figure 1.2:** Corrélation de paramètre (M) en fonction des caractéristiques de forme des particules. (a) Rapport d'aspect, (b) Sphéricité, (c) Convexité et (d) Régularité globale (Yang et Luo 2015).

Cherif Taïba et al (2017) ont réalisé des essais triaxiaux en compression monotone sur trois types de sable différents : le sable de Chlef, de forme arrondie, le sable de Fontainebleau, semi-arrondi, et le sable d'Hostun, semi-angulaire. Ces échantillons avaient une densité relative initiale de 52% et étaient soumis à une pression de confinement de 100 kPa. Leurs observations ont révélé que la morphologie des particules exerçait une influence significative sur la résistance au cisaillement non drainé des sables, comme le montre la Figure 1.3.



**Figure 1.3 :** Réponse non-drainée du mélange sable-limon ( $P'_c=100$  kPa,  $Dr=52\%$ ) (a)- Évolution de déviateur de contrainte (b)- Chemin de contrainte dans le plan ( $p'$ ,  $q$ ) (Cherif Taiba 2017).

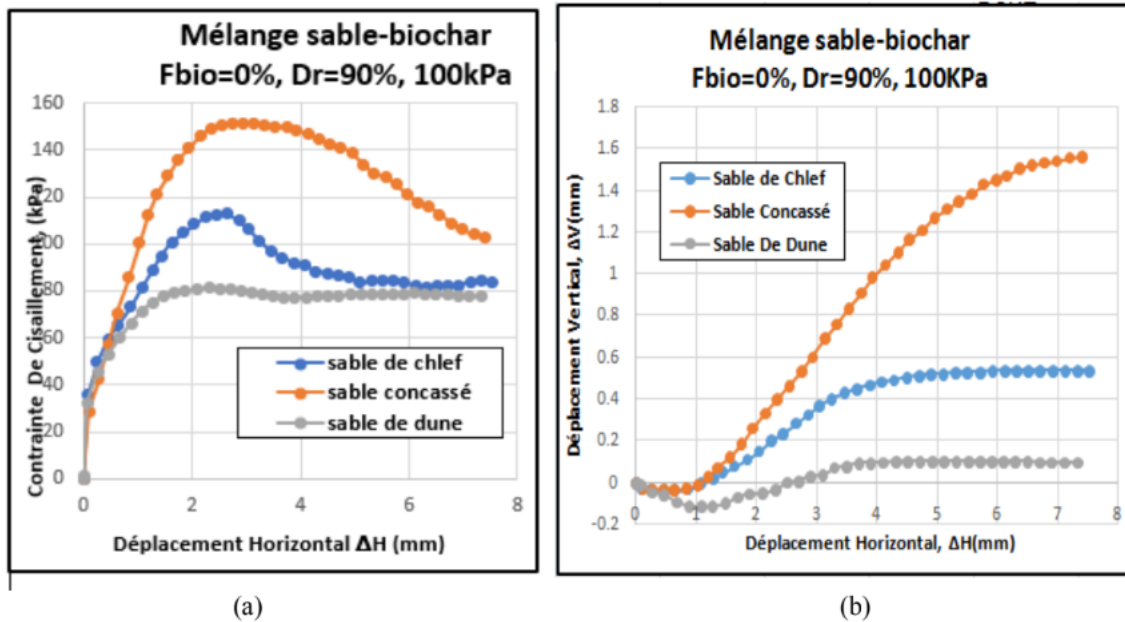
Xiao et al (2019) ont réalisé des essais triaxiaux monotones afin d'étudier l'effet de la régularité globale sur la résistance au cisaillement non drainé des mélanges de sable et de fines non plastiques. Leur étude a mis en évidence une relation entre l'augmentation du rapport de déviateur au pic, passant de 0,77 à 1,19 MPa, et la diminution de la régularité globale, de 0,971 à 0,844, avec un impact notable sur la résistance au cisaillement non drainé. De plus, ils ont observé qu'une pression de confinement accrue, de 0,05 à 0,4 MPa, pour une même angularité (0,876), entraînait une augmentation de la déformation axiale au pic de 4,19% à 7,35%. En outre, en maintenant la pression de confinement constante à 0,2 MPa, la diminution de la régularité globale de 0,971 à 0,844 a provoqué une augmentation de la déformation axiale au pic de 2,46% à 7,19%, comme illustré dans la Figure 1.4.



**Figure 1.4 :** (a) Variations du rapport de déviateur au pic et la déformation axiale au pic avec la pression de confinement et la régularité globale des mélanges. (Xiao et al.2019).

Ali Taleb et Adda (2023) ont réaliser des essais de cisaillement effectués sur des mélanges de différents types de sable, comprenant le sable de Chlef (à grains arrondis), le sable de dune (à grains sphériques) et le sable concassé (à grains anguleux), en combinaison avec différentes proportions de biochar allant de 0% à 40%, qui sont présentés dans le Figures 1.5. leur échantillons, préparés en laboratoire avec une densité relative initiale de  $Dr=90\%$ , ont été soumis à une contrainte normale initiale constante de  $\sigma_n=100$  kPa. Cependant Leur résultats des essais ils ont remarqué clairement que la forme des grains a un impact significatif sur la résistance au cisaillement des mélanges de sable et de biochar. Sans biochar ( $F_{bio}=0\%$ ), ils ont observé que le sable concassé montre une résistance au cisaillement extrêmement élevée ( $\tau_{max}=151.361$  kPa) par rapport aux deux autres types de sable, avec  $\tau_{max}=112.694$  kPa pour le sable de Chlef et  $\tau_{max}=81.333$  kPa pour le sable de dune, sous une contrainte normale initiale constante de 100 kPa ( $\sigma_n=100$  kPa). Ils ont remarqué que ce comportement est attribuable aux forces inter granulaires générées par les grains anguleux, entraînant ainsi une augmentation significative de la résistance au cisaillement par rapport aux échantillons composés de grains arrondis et

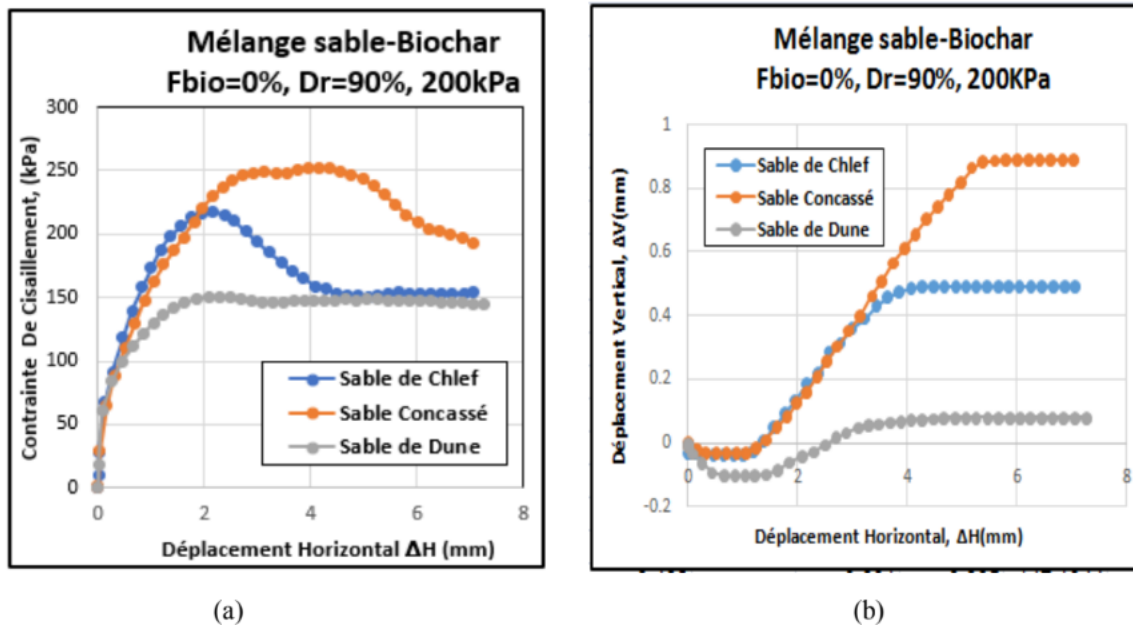
sphériques. Même pour les mélanges de sable et de biochar ( $F_{bio}=10\%$  et  $20\%$ ), ils ont observé que le mélange de sable concassé avec du biochar présente une résistance au cisaillement plus élevée ( $\tau_{max}=132.111$  kPa et  $\tau_{max}=145.888$  kPa) par rapport au mélange de sable de Chlef avec du biochar ( $\tau_{max}=108.639$  kPa et  $\tau_{max}=111.167$  kPa) et au mélange de sable de dune avec du biochar ( $\tau_{max}=89.944$  kPa et  $\tau_{max}=112.166$  kPa). Ils ont remarqué que ce phénomène est principalement dû à la présence des particules de biochar dans les vides entre les grains anguleux, contribuant ainsi à amplifier les contacts et augmenter les forces intergranulaires par rapport aux grains arrondis et sphériques respectivement. Cependant, lorsque la proportion de biochar atteint  $F_{bio}=40\%$ , ils ont remarqué que le mélange de sable de Chlef avec du biochar présente une résistance au cisaillement plus élevée ( $\tau_{max}=136.139$  kPa) par rapport aux autres mélanges, à savoir le sable concassé et le sable de dune avec du biochar ( $\tau_{max}=120.111$  kPa et  $\tau_{max}=116.472$  kPa). L'analyse des déplacements verticaux-horizontaux met en évidence l'impact de la forme des particules sur le comportement mécanique des mélanges sable-biochar, où la forme des particules joue un rôle prépondérant dans l'augmentation de la phase de dilatance (comportement dilatant) pour la contrainte normale initiale examinée.



**Figure 1.5:** Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique des mélanges sable-biochar ( $\sigma_n=100$  kPa,  $D_r=90$  %,  $F_{bio}=0$  %) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b) Evolution de déplacement vertical. (Ali Taleb et Adda.2023)

Ali Taleb et Adda. (2023) ont réaliser des essais de cisaillement, illustrés dans les figures 1.6, qui ont été obtenus à partir de mélanges de différents types de sable (sable de Chlef, sable de dune et sable concassé) combinés à différentes proportions de biochar, allant de 0% à 40%. Leurs essais ont été menés sur des échantillons préparés en laboratoire avec une densité relative initiale de  $D_r=90\%$  et soumis à une contrainte normale initiale constante de  $\sigma_n=200$  kPa. Leur résultat des essais mettent en évidence l'impact significatif de la forme des grains sur la résistance au cisaillement des mélanges de sable et de biochar. En l'absence de biochar ( $F_{bio}=0\%$ ), ils ont observé que le sable concassé présente une résistance au cisaillement exceptionnellement élevée ( $\tau_{max}=252.472$  kPa) par rapport aux deux autres types de sable, avec  $\tau_{max}=217.333$  kPa pour le sable de Chlef et  $\tau_{max}=150.777$  kPa pour le sable de dune, sous une contrainte normale initiale constante de  $\sigma_n=200$  kPa. Leurs résultats montrent également que même pour les mélanges de sable et de biochar ( $F_{bio}=10\%$  et  $20\%$ ), ils ont remarqué que le mélange de sable concassé avec du biochar affiche une résistance au cisaillement supérieure ( $\tau_{max}=223.638$  kPa et  $\tau_{max}=225.083$  kPa) par rapport au mélange de sable de Chlef avec du biochar ( $\tau_{max}=199.389$

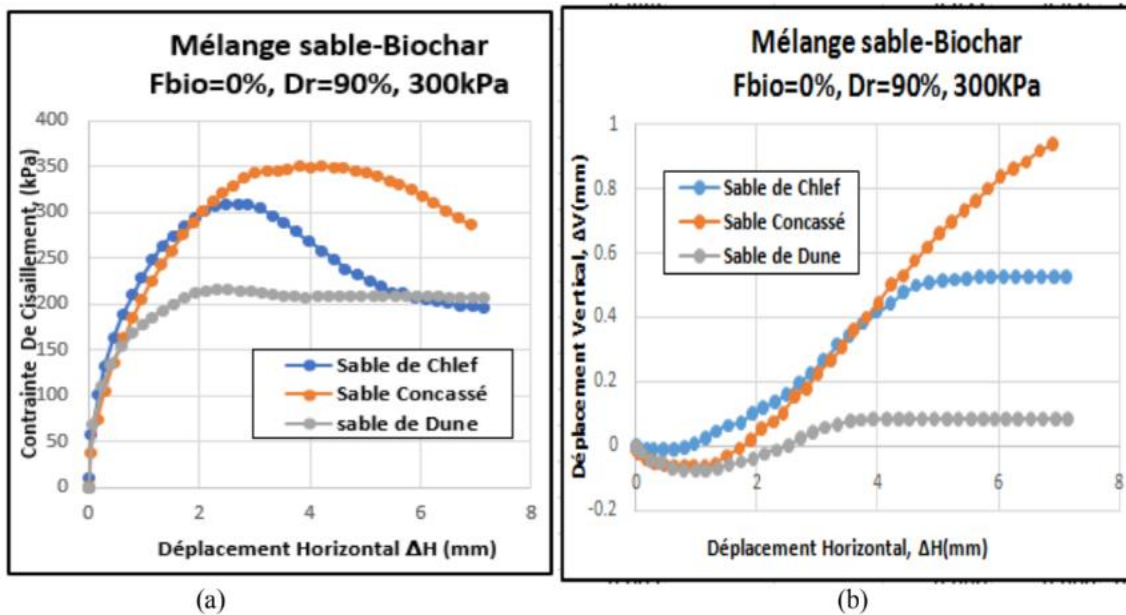
kPa et  $\tau_{\max}=208.75$  kPa) et au mélange de sable de dune avec du biochar ( $\tau_{\max}=167.388$  kPa et  $\tau_{\max}=180.50$  kPa). Toutefois, ils ont constaté que lorsque la proportion de biochar atteint  $F_{\text{bio}}=40\%$ , le mélange de sable de Chlef avec du biochar présente une résistance au cisaillement plus élevée ( $\tau_{\max}=219.944$  kPa) que les autres mélanges, à savoir le sable concassé et le sable de dune avec du biochar ( $\tau_{\max}=219.90$  kPa,  $\tau_{\max}=213.638$  kPa). Par ailleurs, l'analyse des déplacements verticaux-horizontaux souligne l'influence de la forme des particules sur le comportement mécanique des mélanges sable-biochar. La forme des particules joue un rôle prépondérant dans l'augmentation de la phase de dilatance (comportement dilatant) pour la contrainte normale initiale examinée, comme illustré dans les figures 1.6b.



**Figure 1.6:** Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique des mélanges sable-biochar ( $\sigma_n=200$  kPa,  $D_r=90\%$ ,  $F_{\text{bio}}=0\%$ ) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b) Evolution de déplacement vertical. (Ali Taleb et Adda.2023)

Ali Taleb et Adda (2023) ont réalisé des essais de cisaillement sur des mélanges de différents types de sable (sable de Chlef, sable de dune et sable concassé) avec différentes proportions de biochar (de 0% à 40%) qui sont exposés dans les figures 1.7. Leurs échantillons ont été élaborés en laboratoire avec une densité relative initiale de 90% ( $D_r=90\%$ ) et ont été soumis à une contrainte

normale initiale constante de  $\sigma_n=300$  kPa. Leur résultats mettent en évidence l'importance de la forme des grains dans la résistance au cisaillement des mélanges de sable et de biochar. En l'absence de biochar ( $F_{bio}=0\%$ ), ils ont observé que le sable concassé se distingue par une résistance au cisaillement exceptionnellement élevée ( $\tau_{max}=350.083$  kPa) par rapport aux autres types de sable, tels que le sable de Chlef ( $\tau_{max}=309.333$  kPa) et le sable de dune ( $\tau_{max}=216.083$  kPa), pour une contrainte normale initiale constante de  $\sigma_n=300$  kPa. Leurs résultats montrent également que, même pour les mélanges de sable et de biochar ( $F_{bio}=10\%$  et  $20\%$ ), ils ont remarqué que le mélange de sable concassé avec du biochar affiche une résistance au cisaillement supérieure ( $\tau_{max}=317.722$  kPa et  $\tau_{max}=315.111$  kPa) par rapport aux mélanges de sable de Chlef avec du biochar ( $\tau_{max}=289.916$  kPa et  $\tau_{max}=274.611$  kPa) et de sable de dune avec du biochar ( $\tau_{max}=234.138$  kPa et  $\tau_{max}=244.361$  kPa). Cependant, ils ont constaté que lorsque la proportion de biochar atteint  $40\%$  ( $F_{bio}=40\%$ ), le mélange de sable de Chlef avec du biochar présente une résistance au cisaillement plus élevée ( $\tau_{max}=305.777$  kPa) que les autres mélanges, tels que le sable concassé et le sable de dune avec du biochar ( $\tau_{max}=302.027$  kPa et  $\tau_{max}=300.555$  kPa). En outre, l'analyse du plan de déplacement vertical-horizontal met en évidence l'influence de la forme des particules sur le comportement mécanique des mélanges sable-biochar. La forme des particules joue un rôle prépondérant dans l'augmentation de la phase de dilatance (comportement dilatant) pour la contrainte normale initiale examinée, comme le montrent les figures 1.7.b.



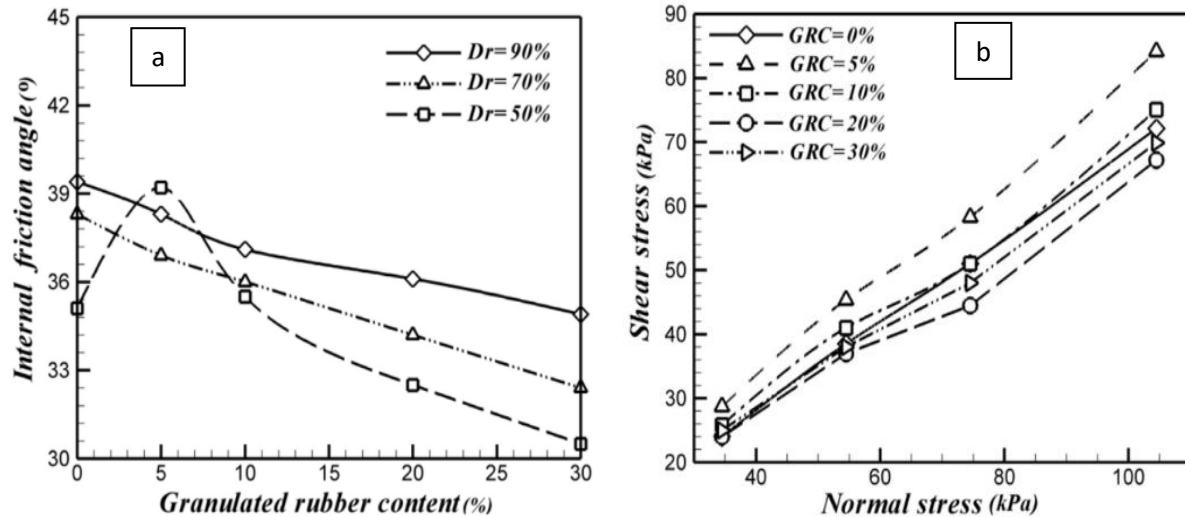
**Figure 1.7:** Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique des mélanges sable-biochar ( $\sigma_n=300$  kPa,  $D_r=90$  %,  $F_{bio}=0$  %) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b) Evolution de déplacement vertical. (Ali Taleb et Adda.2023)

### 1.3 Paramètres de résistance au cisaillement

D'après Anvari et al. (2017) Leur figure 1.8.a. met en évidence les impacts de la densité relative et de la concentration de caoutchouc granulé sur l'angle de frottement interne des mélanges. Ils ont constaté une diminution de l'angle de frottement interne des mélanges à mesure que la densité relative décroît. De plus, aux densités relatives de 70 % et 90 %, ils ont remarqué que l'angle de frottement interne des mélanges diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc granulé. À une densité relative de 50 %, ils ont observé que l'angle de frottement interne du mélange augmente jusqu'à atteindre 40 % pour une concentration de caoutchouc granulé de 5 % (en poids), dépassant la valeur du sable pur. Toutefois, l'ajout de davantage de caoutchouc granulé entraîne une diminution de l'angle de frottement interne.

Les enveloppes de contrainte de cisaillement pour les échantillons avec différentes concentrations de caoutchouc granulé à une densité relative de 50 % sont présentées dans la figure 1.8.b comme ils ont constaté, la contrainte de cisaillement augmente avec l'augmentation de la contrainte normale. À l'exception des échantillons avec une teneur en

caoutchouc granulé de 5 % (en poids), les enveloppes de contrainte de cisaillement des échantillons sont approximativement similaires les unes aux autres. De plus, d'après eux il est essentiel de souligner que la différence entre les enveloppes de contrainte de cisaillement devient plus évidente avec l'augmentation de la contrainte normale.

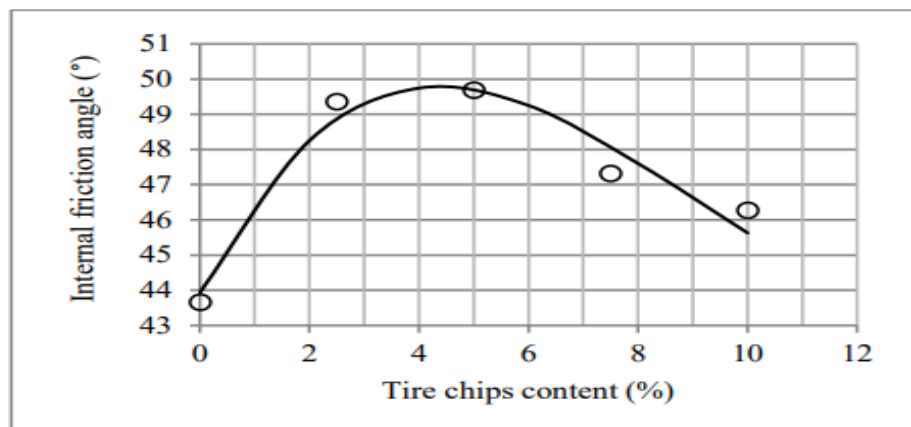


**Figure 1.8:** (a) Variations de l'angle de frottement interne avec la teneur en caoutchouc granulé à diverses densités relatives, et (b) enveloppes de contrainte de cisaillement pour des spécimens avec différentes teneurs en caoutchouc granulé ( $Dr = 50\%$ ). (Anvari et al. 2017)

D'après Aksoy et al. (2021) Des nombreux chercheurs se sont penchés sur les caractéristiques de résistance au cisaillement du mélange sable-coqueaux de pneus afin d'étudier l'influence de la teneur en copeaux de pneus sur les paramètres de résistance au cisaillement du sable. Dans leur perspective, la plupart d'entre eux ils ont utilisé des essais de boîte de cisaillement, tout comme cette étude présentée par Aksoy et al. Leur Tableau 1.1 présente le pourcentage optimal de copeaux de pneus provoquant une augmentation de l'angle de frottement ( $\phi$ ) du mélange sable-coqueaux de pneus, tel que relevé dans la littérature. Ils ont observé, d'après le Tableau 1.1, que les résultats de ces chercheurs varient en raison des différences de taille de particules entre le

sable et les copeaux de pneus utilisés par chacun, ainsi que des densités relatives ( $D_r$ ) différentes. Par exemple, Edincliler et al., (2010) ont utilisé un système d'essai triaxial pour étudier l'effet des copeaux de pneus sur le sable, concluant que l'augmentation de la teneur en copeaux de pneus entraînait une diminution de l'angle de frottement interne.

Aksoy et al ont remarquer clairement dans le tableau que le pourcentage optimal de copeaux de pneus varie de 5% à 25% en poids. Ils peuvent affirmer que le pourcentage optimal de copeaux de pneus, engendrant une augmentation de l'angle de frottement ( $\phi$ ) du mélange sable-copeaux de pneus, dépend de la teneur en copeaux de pneus, de la densité relative du mélange, de la contrainte normale et de la granulométrie du sable et des copeaux de pneus. Dans leur étude, le pourcentage optimal de copeaux de pneus a également été déterminé comme étant de 5% en poids. Ils ont remarqué que les résultats de cette étude sont compatibles avec ceux trouvés par Anvari et al., (2017).



**Figure 1.9:** Variation de l'angle de frottement ( $\phi$ ) du sable en fonction de la teneur en copeaux de pneus. (Aksoy et al. 2021)

**Tableau 1.1:** le pourcentage optimal de copeaux de pneus pour augmenter le  $(\phi)$  du sable trouvé par certains chercheurs.

Reference	The particle size of the Sand (mm)	The particle size of the Tire chips (mm)	The optimum percentage of tire chips (%)	Relative density of soil ( $D_r$ )	$(\phi)$ of sand alone ( $^\circ$ )	$(\phi)$ of sand-tire chips mixture ( $^\circ$ )
Edinçliler et al., (2010)	0.07-2	0.07-5	5% by weight	$D_r \cong 70\%$	41.5	38.2
Ghazavi et al., (2011)	0.07-1.2	0.07-10.5	30% by volume	Loose	39.7	43
Marto et al., (2013)	0.06-5	1-4	20% by weight	$D_r = 70\%$	32.8	34.2
Tiwari et al., (2017)	0.07-1.3	0.07-5	25% by weight	Loose	30	35
Tiwari et al., (2017)	0.07-1.3	0.07-5	25% by weight	Dense	37	39
Anvari et al., (2017)	0.08-1	1-5	5% by weight	$D_r = 50\%$	35.1	39.2
Rouhanifar et al., (2020)	0.3-1.25	0.075-0.3 0.3-1 1.2-5	20% by volume	$D_r = 30\%$	30.7 30.7 30.7	31.8 35 33.8
<b>This study</b>	0.0015-9.5	0.075-2.5	5% by weight	Proctor density	43.6	49.7

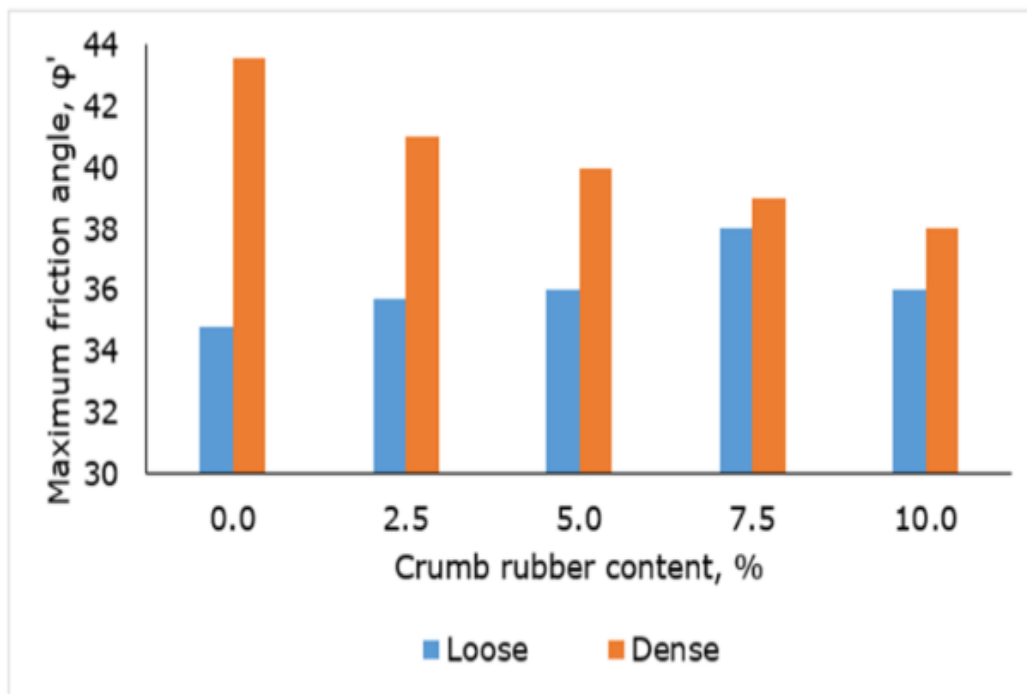
#### 1.4 Impact de la teneur en caoutchouc granulé sur l'angle de frottement maximum :

D'après Sung et al. (2022) ils présentent dans la Figure 1.10 l'angle de frottement maximum pour différentes teneurs en caoutchouc granulé dans un état lâche et dense. Ils ont observé que les échantillons lâches ont montré une amélioration de la résistance au cisaillement avec l'ajout de caoutchouc granulé jusqu'à 7,5%. Bien que la résistance au cisaillement contenant 10% de caoutchouc granulé ait été observée en diminution après 7,5%, l'angle de frottement était légèrement amélioré par rapport au sable non renforcé. L'angle de frottement maximum a été atteint avec une teneur en caoutchouc granulé de 7,5%, avec une valeur de  $38,0^\circ$ . Ils ont remarqué aussi Pour les échantillons denses, l'angle de frottement diminue avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc granulé. La valeur maximale de l'angle de frottement obtenue était de  $43,6^\circ$  avec 0% de caoutchouc granulé.

En revanche, d'après eux l'arrangement des particules, influencé par le degré de compactage, a un impact sur la résistance au cisaillement du sable contenant des caoutchoucs granulés. Ils ont

constaté que les échantillons lâchement emballés montrent une amélioration du frottement entre les particules de caoutchouc et de sable. Sous des conditions lâches, la texture de surface rugueuse du caoutchouc est utilisée pour améliorer le frottement entre les particules. Cependant, pour les échantillons denses, la capacité à résister au cisaillement diminue à mesure que la teneur en caoutchouc granulé augmente. La présence de particules de caoutchouc granulé sous des conditions denses réduit les propriétés d'inter blocage du sable. Du point de vue des propriétés de surface, les particules de caoutchouc granulé sous des conditions denses sont comprimées, entraînant une réduction de la surface et donc une réduction de la capacité à mobiliser le frottement.

En général, d'après eux aussi un mélange de caoutchouc et de sable sous des conditions lâches améliore l'angle de frottement entre les particules de 9,2%. L'interaction entre les particules de caoutchouc et de sable fournit des propriétés d'inter blocage plus élevées mais commence à diminuer à mesure que la concentration de caoutchouc augmente. Cependant, l'efficacité du frottement entre les particules de caoutchouc et de sable diminue sous des conditions denses jusqu'à 12,8%.

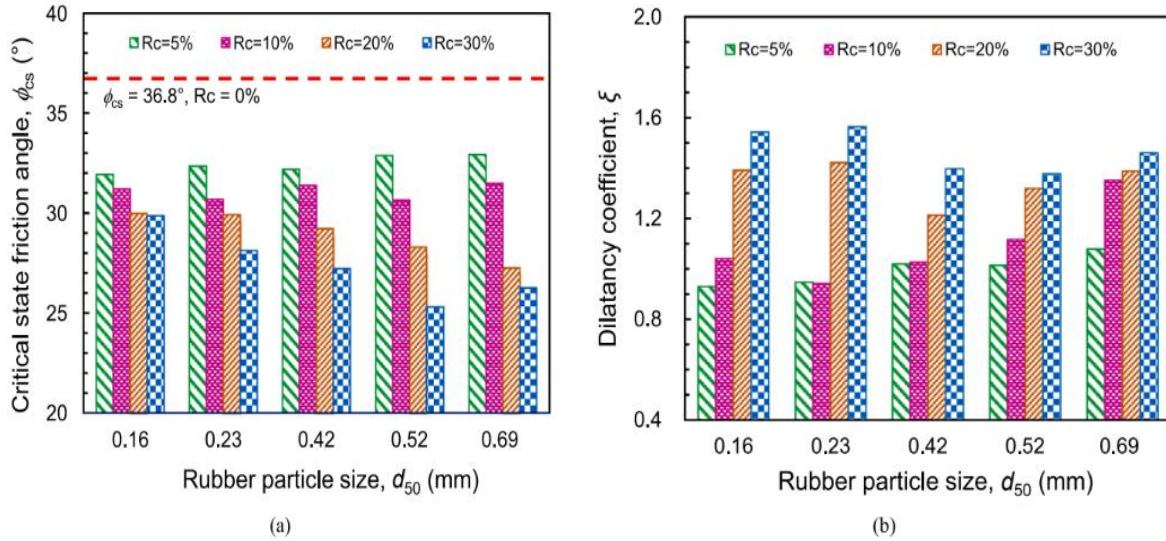


**Figure 1.10:** Angle de frottement maximum en fonction de la teneur en caoutchouc granulé. (Sung et al. 2022)

D'après Daghistani et al. (2023) dans la Figure 1.11 ils ont comparé l'angle de frottement à l'état critique et le coefficient de dilatance pour toutes les teneurs en caoutchouc considérées, en prenant simultanément en compte différentes tailles de particules de caoutchouc. Ils ont observé que  $\phi_{cs}$  ( $= 36.8^\circ$ ) atteint sa valeur maximale pour le sable pur ( $R_c = 0\%$ ) et diminue à mesure que la teneur en caoutchouc augmente, indépendamment de la variation de la taille des particules de caoutchouc.

D'après eux ils ont remarqué que le coefficient de dilatance  $\xi$ , qui ont indiqué dans la Figure 1.11.b augmente avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc. Plus particulièrement, la tendance/le degré de réduction (augmentation) de l'angle de frottement à l'état critique (et du coefficient de dilatance) est influencé par la variation de la taille des particules de caoutchouc. Dans La Figure 1.11.a ils ont indiqué que la diminution de  $\phi_{cs}$  avec la variation de la teneur en caoutchouc est graduelle avec une petite taille de particules, mais cette diminution est plus marquée avec une grande taille de particules.

Ils ont observé dans la Figure 1.11.b que le degré d'augmentation du coefficient de dilatance avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc devient moins prononcé à mesure que la taille des particules de caoutchouc augmente de 0,16 mm à 0,69 mm. En d'autres termes, d'après eux l'influence de la teneur en caoutchouc sur les relations contrainte-dilatance des MRS est corrélée à l'impact résultant de la taille des particules de caoutchouc.



**Figure 1.11:** Une comparaison de (a) l'angle de frottement à l'état critique et (b) le coefficient de dilatance à diverses teneurs en caoutchouc. (Daghistani et al. 2023)

## 1.5 Effet de quelques facteurs sur la réponse mécanique des sols :

### 1.5.1 Tailles des grains

La taille des particules affecte considérablement la résistance au cisaillement non drainé atterrir. Que ce soit à partir des travaux empiriques de Lee et Fitton (1986) ou de observations in situ (Tsuchida 1970, Seed et Idriss. 1971). Certaines gammes de granulométries ont été recommandé pour les sols à faible résistivité. Pecker (1984) a proposé des exemples de ces courbes granulométriques où il a constaté que le gravier et le sol étaient de grande taille les éléments ne risquent pas de s'effondrer (perdre de la résistance) grâce à leur grande perméabilité comme le montre la figure (1.12).

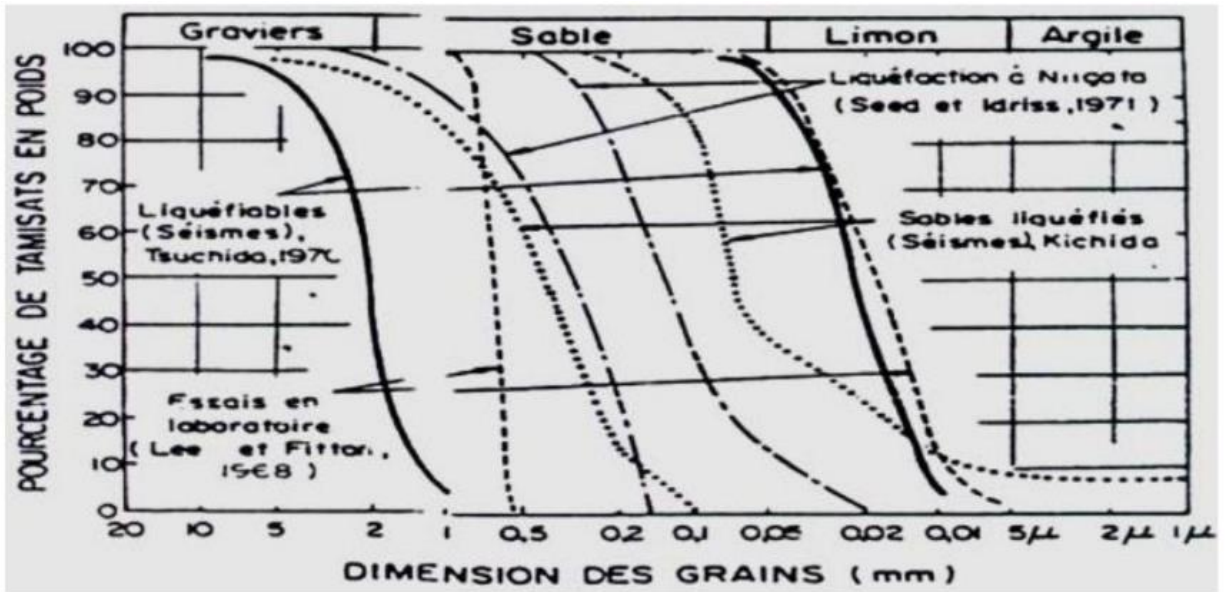
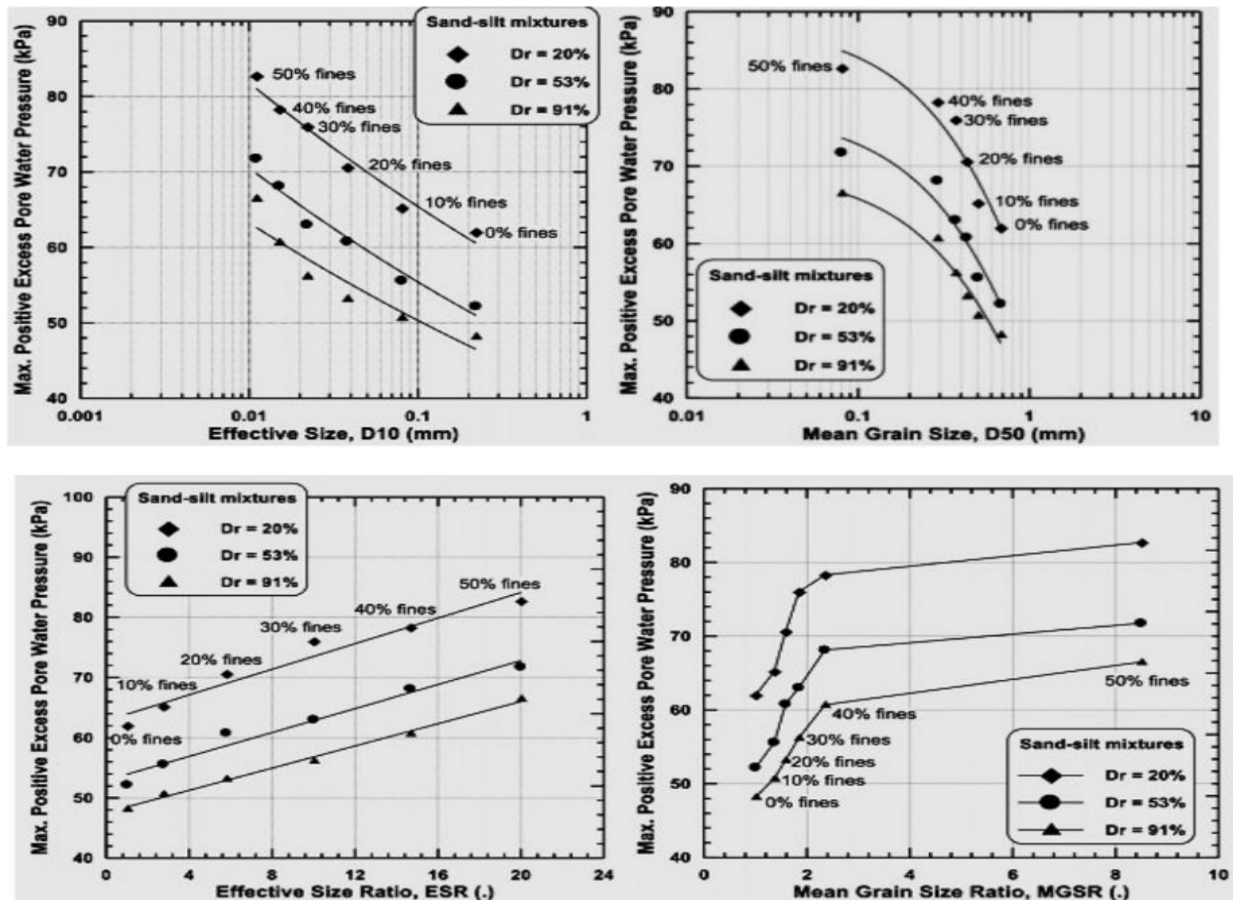


Figure 1.12: Exemples des courbes granulométriques des sols (Pecker. (1984).)

Une autre étude initiée par Belkhatir et al. (2014), où ils ont également étudié l'impact de taille des grains au comportement mécanique en termes d'évolution de la pression alternance de sable limoneux.

Leurs échantillons ont été reconstitués en laboratoire avec La gamme de teneur en particules fines légèrement plastiques varie de ( $F_c=0\%$  à  $F_c=40\%$ ) à trois densités relatives ( $D_r=20\%$ ,  $53\%$  et  $91\%$ ). Ils ont constaté que la pression interstitielle diminuait en conséquence augmenter ( $D_{10}$  et  $D_{50}$ ), puis introduire de nouvelles propriétés taille des particules comme ( $ESR = D_{10sable} / D_{10mélanges}$  et  $MGSR = D_{50sable} / D_{50mélanges}$ ).

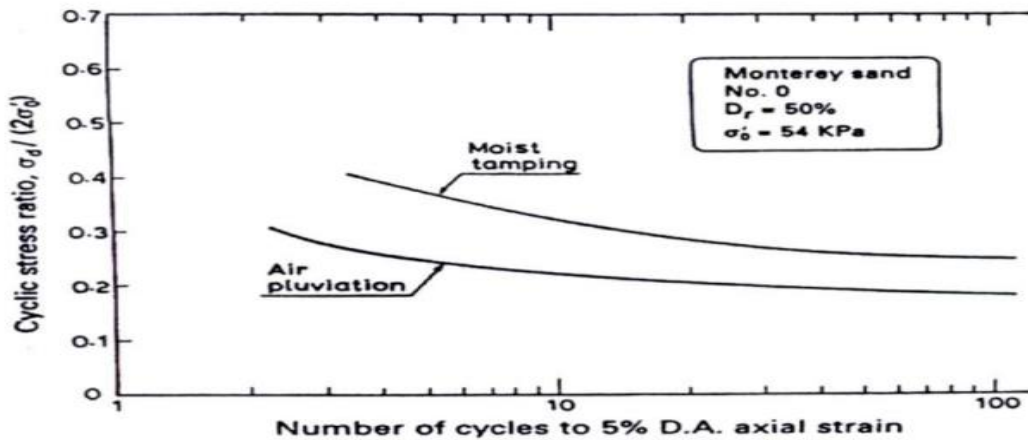
En étudiant les effets de ces caractéristiques, ils ont découvert que la pression interstitielle de l'eau augmente avec l'augmentation ( $ESR$  et  $MGSR$ ) et une relation linéaire existe entre ces caractéristiques granulométriques et la pression interstitielle de l'eau du mélange sable-limoneux est étudié comme le montre la figure (1.13).



**Figure 1.13 :** Influence des caractéristiques granulométriques (D10, D50, ESR, MGSR) sur la pression interstitielle d'un sable limoneux . (Belkhatir et al. (2014))

### 1.5.2 Influence de la méthode de déposition sur le comportement mécanique des sols

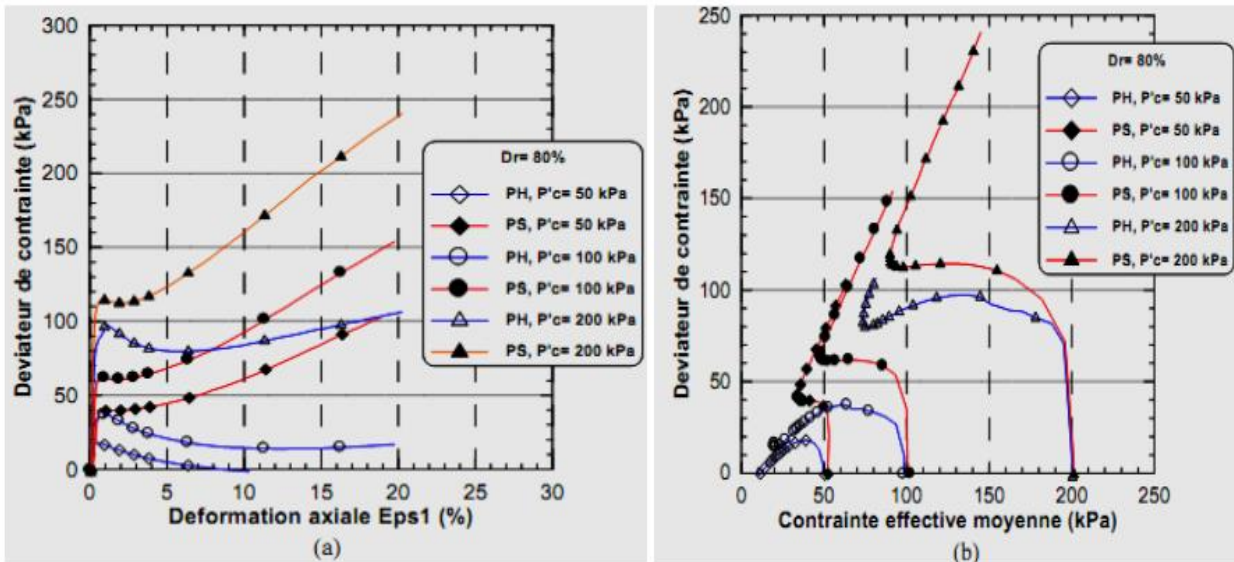
Plusieurs chercheurs se sont penchés sur l'impact du mode de préparation des échantillons, également connu sous le nom de « méthode de reconstitution », sur le comportement mécanique des sols. Mulilis et al. (1977) ont conduit des essais triaxiaux sur le sable de Monterey reconstitué en laboratoire selon deux modes de préparation distincts, à savoir la pluviométrie à sec et le damage humide, à une densité de  $Dr=50\%$ , avec une pression de confinement de  $P'c=54$  kPa. Leurs résultats ont indiqué que la résistance au cisaillement non drainée était notablement plus élevée pour les échantillons préparés par damage humide par rapport à ceux préparés par pluviométrie à sec, comme illustré dans la figure (1.14).



**Figure 1.14** : Influence du mode de préparation sur la résistance au cisaillement non drainée.

(Mulilis et al. (1977))

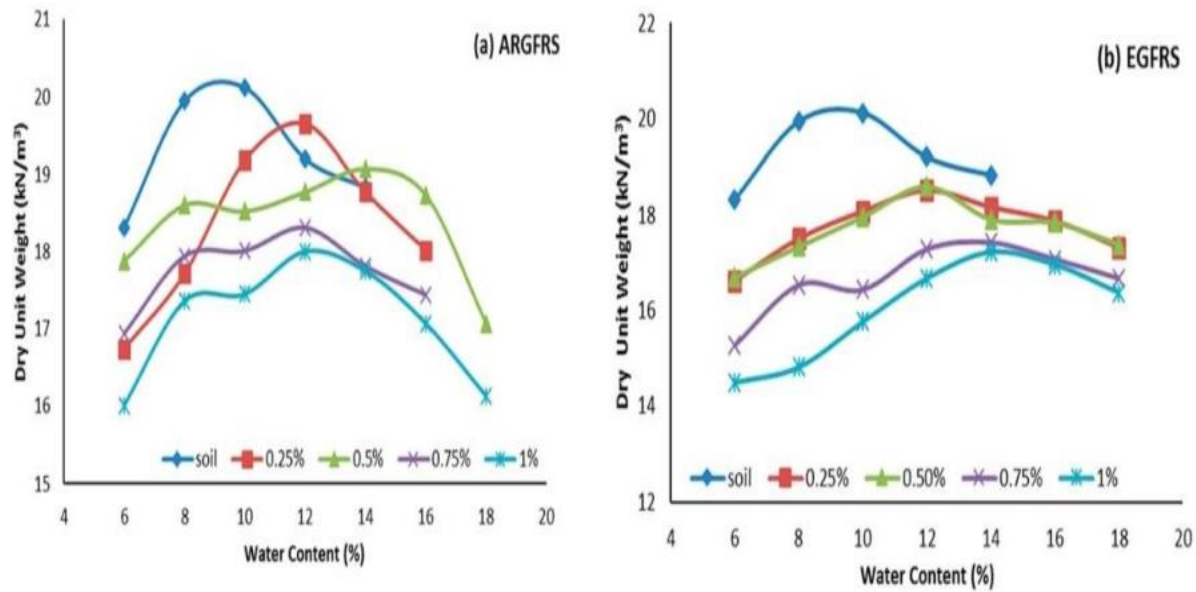
Della et al. (2011b) ont entrepris des essais triaxiaux monotones sur le sable de Chlef dans le but d'examiner l'influence de la méthode de déposition sur le comportement mécanique des échantillons reconstitués par pluviation à sec et par damage humide. Ces échantillons, initialement à une densité relative de ( $D_r=80\%$ ), ont été soumis à trois pressions de confinement différentes ( $P'_c=50$  kPa, 100 kPa et 200 kPa). Les résultats ont révélé que les échantillons préparés par la méthode de pluviation à sec présentent un comportement plus dilatant par rapport à ceux préparés par la méthode de damage humide, lesquels manifestent un comportement contractant, comme illustré dans la figure (1.15).



**Figure 1.15:** Influence de la méthode de déposition sur la réponse non drainée du sol de Chlef, (a) courbe de cisaillement, (b) chemin de contrainte, (Della et al., (2011))

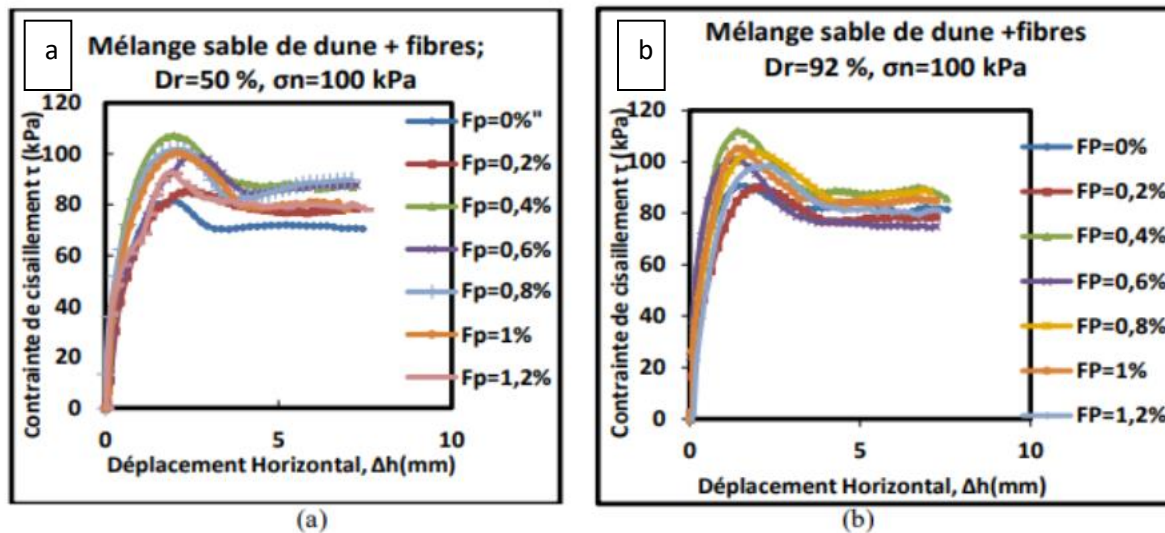
### 1.5.3 Influence de la teneur en fibres

L'étude de Sujatha et al. (2018) explorait les caractéristiques mécaniques d'un sol renforcé par l'ajout de fibres de verre. Les résultats indiquent que le sol renforcé avec 0,75% de fibres de verre a montré une résistance à la compression non confinée maximale de 179 kPa, atteinte à une déformation de 8,50% pour le type de fibre AR et de 137,87 kPa à une déformation de 5,02% pour le type de fibre E. En comparaison, le sol non renforcé a présenté une résistance de 71 kPa à une déformation de 4,08%. De plus, la rupture à des déformations plus élevées a démontré que la tension induite par le renforcement des fibres était mobilisée à des déformations de cisaillement plus élevées. Les chercheurs ont également observé une augmentation du comportement ductile du sol avec le renforcement par les fibres de verre, ainsi qu'une perte progressive de la résistance post-pic, comme illustré dans la figure 1.16.



**Figure 1.16:** Courbe de compactage d'un sol renforce de fibre de verre (Sujatha et al (2018))

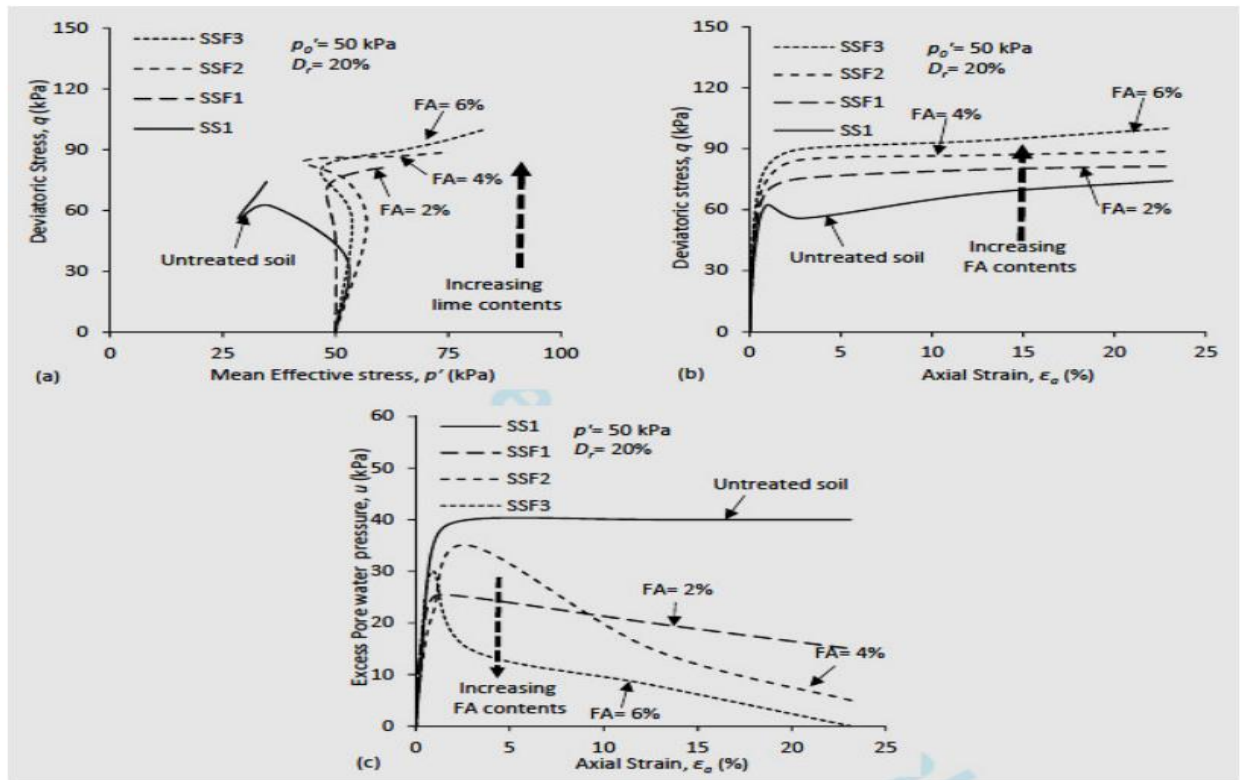
Dans leur étude, Nahar et Messaadia (2022) ont examiné l'impact de la proportion de fibres de palmier ( $0\% \leq F_p \leq 1,2\%$ , par incréments de 2%) sur la résistance au cisaillement des mélanges de sable de dune renforcés par des fibres de palmier. Leur recherche a révélé que l'incorporation de fibres de palmier a un effet significatif sur les propriétés mécaniques de ces mélanges. Ils ont observé que les échantillons de mélanges sable-fibre de palmier avec une proportion de 0,4% ont manifesté une augmentation de la résistance au cisaillement au pic de (31% et 20%) par rapport aux échantillons de sable pur de dune (sans renfort de fibre de palmier,  $F_p=0\%$ ). Au-delà de ce seuil de proportion ( $F_p=0,4\%$ ), une tendance inverse a été remarquée, où l'augmentation de la proportion de fibres de palmier entraîne une diminution de la résistance au cisaillement (voir figure 1.17).



**Figure 1.17:** Comportement mécanique des mélanges sable de dune –fibres (a)- $Dr=50\%$ , (b)- $Dr=92\%$  (Nahar et Messaadia (2022))

#### 1.5.4 Influence des cendres volantes

Kermatikerman et al. (2018) ont conduit des essais de compression triaxiale non drainés sur des échantillons de sable reconstitués en laboratoire avec différentes teneurs en cendres volantes ( $FA=0\%$ ,  $2\%$ ,  $4\%$  et  $6\%$ ), à une densité relative initiale lâche de ( $Dr=20\%$ ), soumis à une pression de confinement initiale de ( $P'_c=50$  kPa). Leurs résultats ont révélé que l'incorporation de cendres volantes modifie le comportement contrainte-déformation du sol. De manière significative, ils ont constaté que les cendres volantes jouent un rôle crucial dans l'amplification de la résistance au cisaillement non drainée des sables. Ils ont observé une augmentation de la résistance au cisaillement non drainée avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes, passant de ( $FA=0\%$  à  $6\%$ ) pour les mélanges sable-cendres volantes. Cette augmentation de résistance s'explique par la contribution des cendres volantes à l'augmentation des forces inter granulaires entre les grosses particules des sables, comme illustré dans la figure (1.15).



**Figure 1.18 :** Influence de teneur en cendres volantes sur la résistance au cisaillement non drainée des sols granulaires. (Kermatikerman et al. (2018))

## 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, plusieurs études ont été synthétisées, portant sur l'évaluation de l'efficacité de l'utilisation des différentes formes de particules pour améliorer les propriétés géotechniques des sols.

En général, il est possible de conclure que ces formes peuvent être utilisées comme additifs pour améliorer les performances et les caractéristiques géotechniques des sols de qualité médiocre. Cependant, certaines limites doivent être prises en compte, notamment la teneur optimale des formes à utiliser, qui peut varier d'un type de forme à un autre.

Le prochain chapitre sera dédié à la présentation du dispositif expérimental utilisé, du mode opératoire suivi et des caractéristiques physiques des matériaux étudiés.

## **CHAPITRE 2 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PROCEDURE DE L'ESSAI**

### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous examinerons en détail le dispositif expérimental employé dans notre étude, ainsi que la méthode de test utilisant l'appareil de cisaillement de Casagrande. Nous aborderons également la caractérisation physique des matériaux testés, composés d'un mélange de sols granulaires et de caoutchouc. Enfin, nous décrirons la démarche suivie pour la reconstitution et la préparation des échantillons en vue de réaliser divers essais de cisaillement direct.

### 2.2 Dispositif expérimental

#### 2.2.1 Introduction

En laboratoire, divers essais peuvent être menés pour analyser la réaction mécanique des sols granulaires. Parmi ces essais, on utilise des équipements spécialisés comme la boîte de cisaillement direct de Casagrande, sur un mélange de sable contenant diverses proportions de caoutchouc, comme illustré dans la Figure 2.1.



**Figure 2.1** : Machine de cisaillement direct à la boîte de casagrande .(laboratoire de mécanique des sols de l'université Hassiba Ben Bouali de Chlef, Algérie)

### 2.2.2 But de l'essai

L'objectif principal de l'essai était d'évaluer les propriétés mécaniques d'un sol en réalisant un essai de cisaillement direct à l'aide de la boîte de Casagrande, qui permet de soumettre un échantillon à une charge constante tout en lui appliquant un cisaillement linéaire. Nous avons adopté cette méthode afin d'analyser l'effet de la composition des mélange sable de Chlef-caoutchouc, sable concasses-caoutchouc et sable dune-caoutchouc sur leur réaction mécanique. Cette approche nous a permis d'obtenir la courbe intrinsèque du sol examiné, ainsi que de déterminer son angle de frottement interne  $\varphi$  et sa cohésion  $C$ .

### 2.2.3 Appareillage

Le dispositif "la boîte de cisaillement" est constitué les éléments de base suivants :

- a. **Pierres poreuses** : qui utilisent pour le drainage des échantillons et assurent une bonne adhérence entre l'échantillon et les demi-boîtes ;
  - b. **Demi-boîte supérieur** : qui est formée d'un cadre et d'un piston permettant de respecter la charge verticale  $N$  sur l'échantillon seulement ;
  - c. **Demi-boîte inférieur** : Elle fixe lors de l'essai de cisaillement direct ;
  - d. **Dispositif à contrainte contrôlée** : qui entraîne la demi-boîte inférieure à une vitesse constante la mesure de la contrainte de cisaillement  $\tau$  et s'effectue par un dynamomètre
- Figure (2.2).

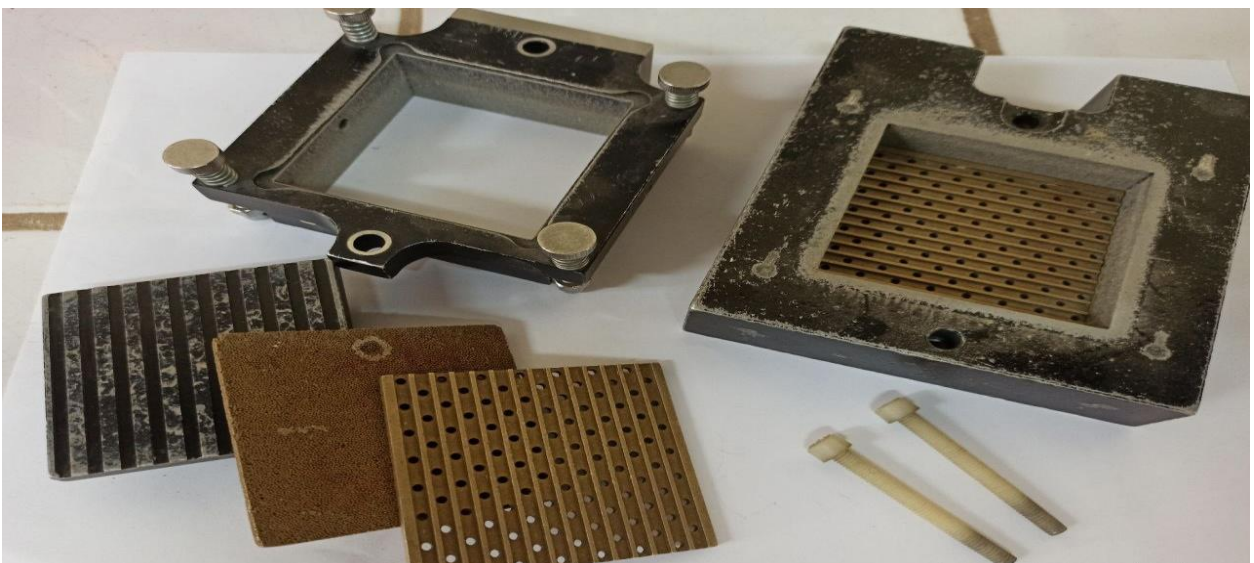


Figure 2.2 : Appareillage

### 2.2.4. Principe de l'essai de cisaillement

L'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande représente une méthode largement utilisée pour évaluer les propriétés mécaniques d'un sol. Cette technique consiste à placer un échantillon de sol cubique (6 cm x 6 cm x 2,5 cm) entre deux demi-boîtes mobiles. Une contrainte verticale  $N$  et un effort tangentiel  $T$  sont appliqués sur l'échantillon selon le plan de symétrie de la boîte. Les contraintes normales sont généralement fixées à des valeurs prédéfinies ( $\sigma_n = 100$  kPa, 200 kPa et 400 kPa), tandis que les contraintes tangentielles sont calculées en suivant une procédure déterminée :

(a) Calculer la surface initiale de la boîte qui est gale ( $6 * 6 = 36$  cm<sup>2</sup>).

(b) Calculer la surface corrigée :  $(L-\Delta L) * L$ .

$$\Delta L = \Delta L_{pic} = \text{vitesse de déformation} * \text{temps} = \text{Déformation} * t$$

(c) Vitesse de déformation appliquée est fixe durant tout l'essai.

Les sols pulvérulents : 1mm/ min.

Les sols cohérents UU ou CU : 1.5 mm/ min.

(d)  $T$  = lecture de comparateur et on convertit dans un tableau qui correspond d'après la fiche technique de l'appareil de cisaillement.

(e) La contrainte de cisaillement  $\tau$  est égale au rapport de l'effort tranchant  $T$  appliqué à la boîte à celui de la surface corrigée « A corrigée »  $\tau = T/A$  corrigée.

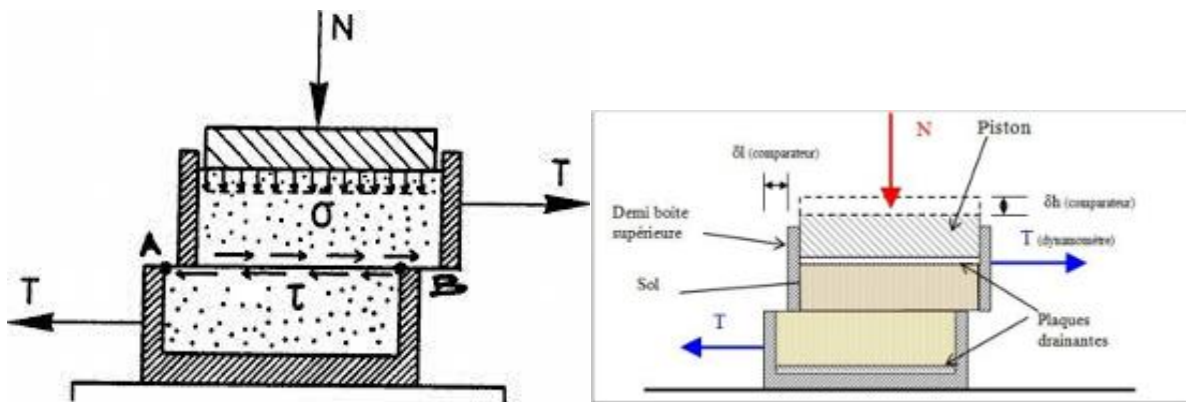


Figure 2.3 : Principe de l'essai de cisaillement direct, (figure d'après NFP94-071-1).

### 2.2.5 Détermination des caractéristiques intrinsèques de sols

En réalisant des essais de cisaillement avec diverses contraintes normales et tangentielles, il devient possible de tracer la courbe intrinsèque d'un échantillon de sol et d'obtenir la courbe de Coulomb ou Mohr-Coulomb. Cela permet de déterminer les valeurs de la cohésion  $c$  et de l'angle de frottement  $\phi$ , comme illustré dans la Figure 2.4. Assurer la fiabilité des résultats nécessite la répétition des essais de cisaillement.

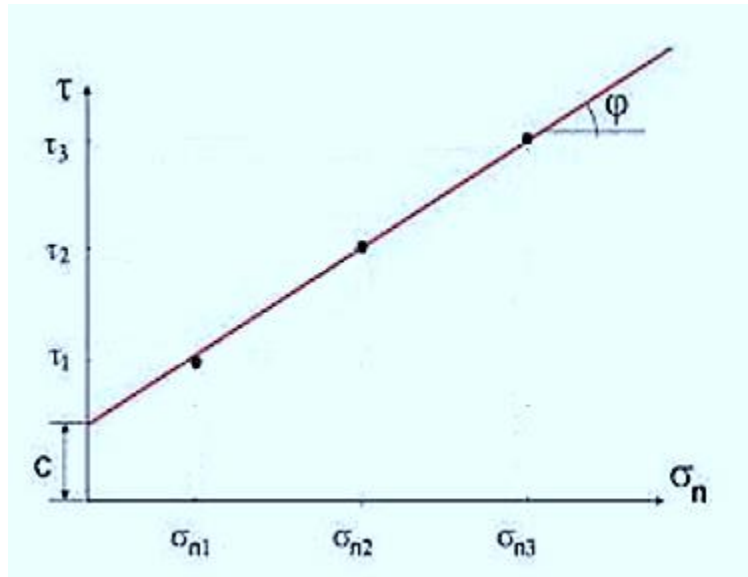


Figure 2.4 : La courbe intrinsèque des sols. Figure d'après NFP94-071-1

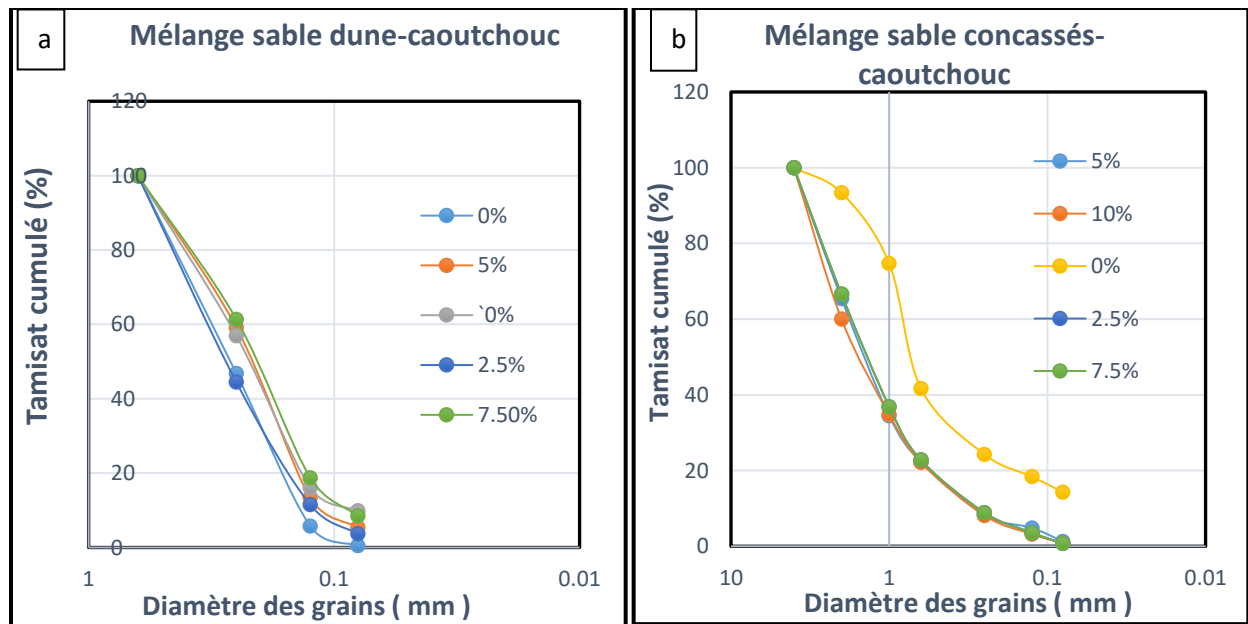
### 2.3. Matériaux testés

Des essais de boîte de cisaillement ont été réalisés sur trois types de sable présentant différentes formes de grains : le sable de Chlef avec une taille maximale de 2,00 mm (désigné « A »), le sable concassé avec une taille maximale de 4,00 mm (désigné « B ») et le sable de dune avec une taille maximale de 0,63 mm (désigné « C »). Ces sables ont été mélangés avec du caoutchouc, dont la taille maximale était de 4,00 mm, à des taux de 0 %, 2.5%, 5%, 7.5% et 10% (exprimés en fraction de caoutchouc). Les propriétés physiques des matériaux étudiés sont résumées dans le tableau (2.2). Les courbes granulométriques des échantillons examinés sont présentées sur la figure (2.6). Les variations des indices de vides en fonction de la teneur en caoutchouc sont illustrées sur la figure (2.7). Il est observé que les indices de vides ( $e_{max}$  et  $e_{min}$ ) augmentent lorsque la quantité de caoutchouc passe de 0 % à 2.5%, 5%, 7.5% et 10%. Cette augmentation est

probablement attribuable à la contribution des particules de caoutchouc, qui augmentent les indices de vides des mélanges de sable-caoutchouc.



**Figure 2.5 :** Les matériaux utilisés dans cette étude expérimental a) sable chlef b) sable concasser c) sable dune d) granulat de caoutchouc.



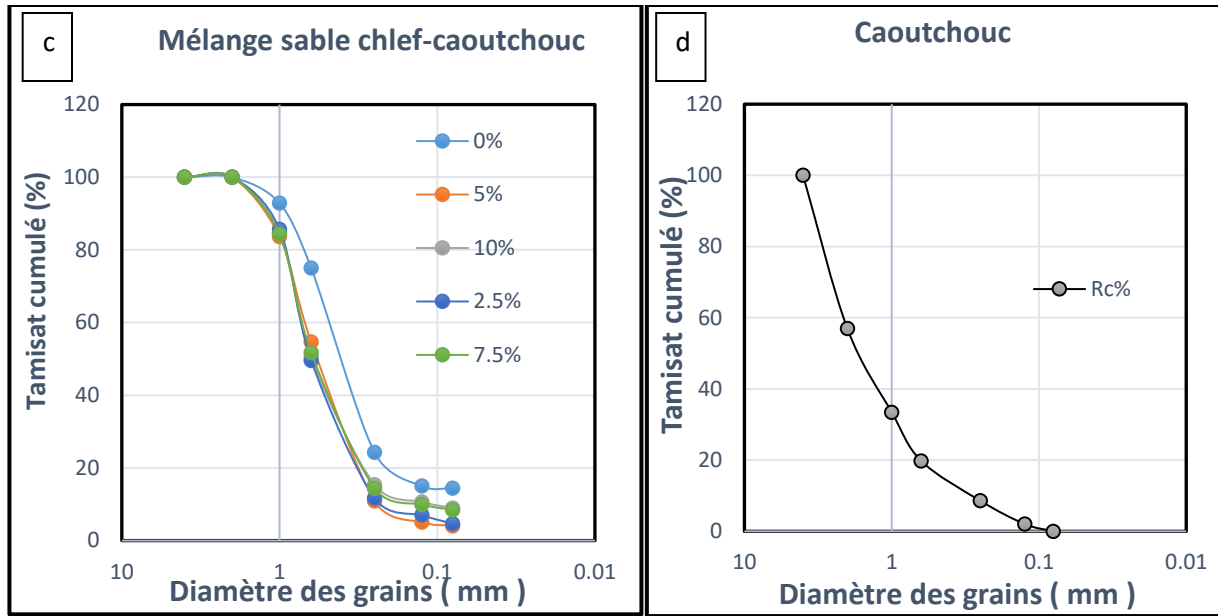
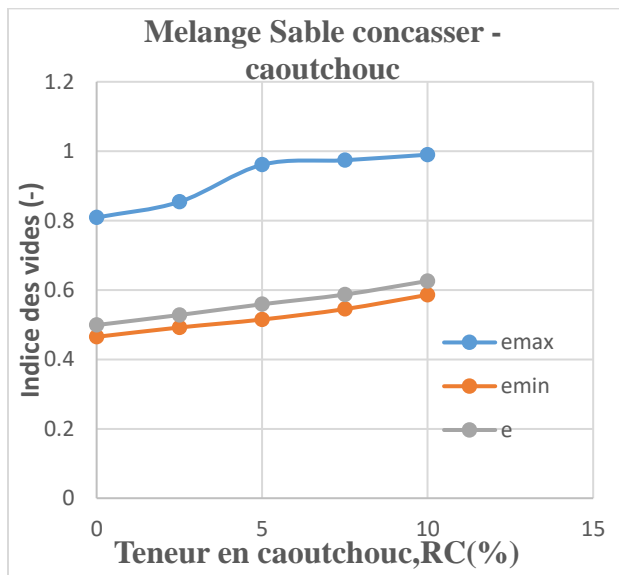
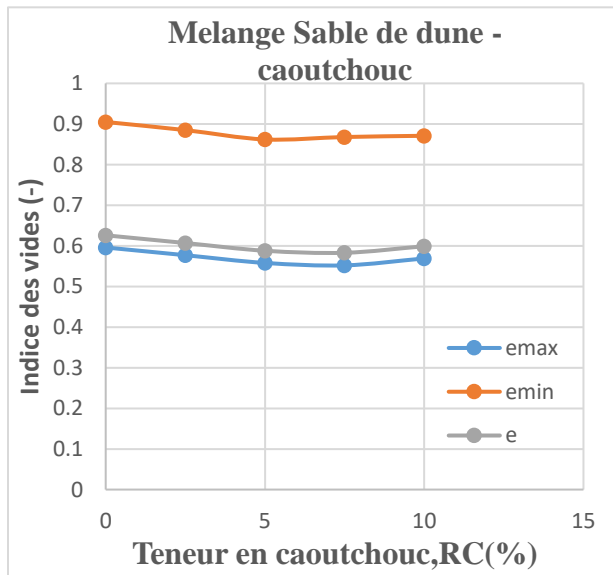


Figure 2.6: Courbes granulométriques des matériaux testés a) sable dune , b) sable concassés , c) sable chlef , d) caoutchouc.



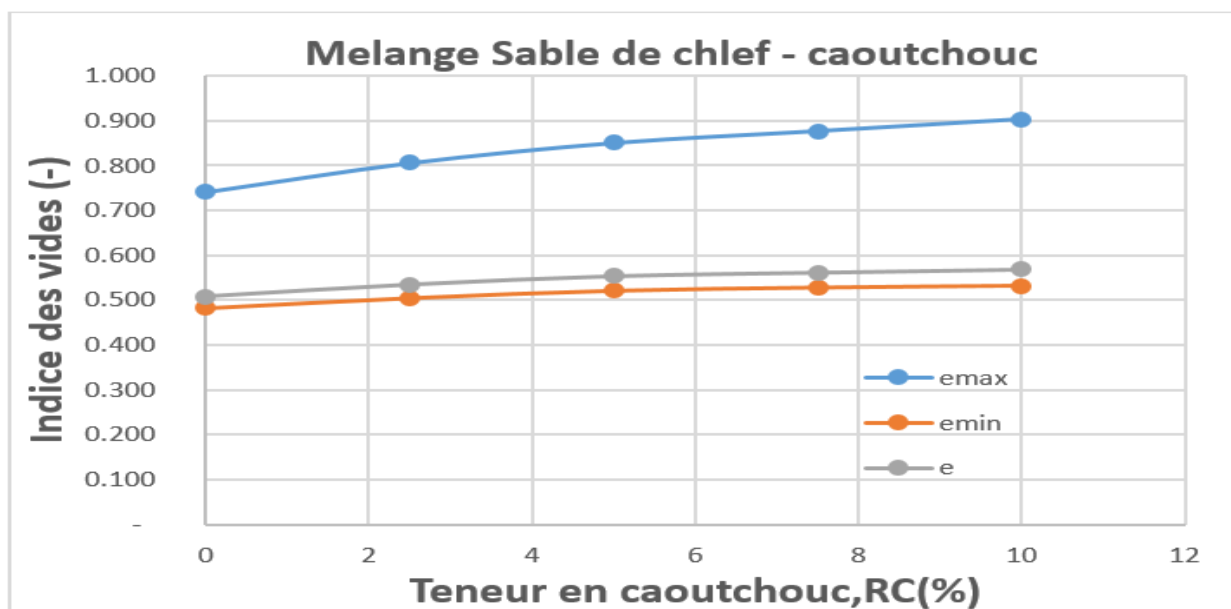


Figure 2.7: Variation des indice des vides en fonction teneur en caoutchouc.

Tableau 2.1: Propriétés physiques des matériaux testés

Sable	Rc %	G <sub>s</sub>	D <sub>max</sub> (mm)	e	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>
Sable de Chlef	0	2.660	2	0.508	0.1	0.29	0.71	7.1	1.185	0.742	0.483
	2.5	2.61		0.535	0.20	0.43	0.74	3.7	1.249	0.806	0.505
	5	2.572		0.554	0.23	0.4	0.69	3	1.008	0.851	0.521
	7.5	2.531		0.562	0.12	0.4	0.72	6	1.852	0.877	0.528

## Chapitre 2 : Dispositif expérimental et procédure de l'essai

	10	2.492		0.569	0.1	0.41	0.73	7.3	2.303	0.904	0.532
<b>Sable concassé</b>	0	2.660	4	0.499	0.1	0.37	0.83	8.3	1.649	0.809	0.465
	2.5	2.61		0.528	0.28	0.8	1.85	6.607	1.236	0.854	0.492
	5	2.572		0.559	0.29	0.86	1.82	6.276	1.401	0.961	0.515
	7.5	2.531		0.587	0.28	0.81	1.77	6.321	1.324	0.974	0.545
	10	2.492		0.626	0.3	0.85	2.1	7	1.147	0.99	0.586
<b>Sable de dune</b>	0	2.660	0.63	0.626	0.13	0.19	0.34	2.615	0.817	0.905	0.596
	2.5	2.61		0.607	0.11	0.19	0.35	3.182	0.938	0.885	0.577
	5	2.572		0.588	0.1	0.17	0.25	2.5	1.156	0.862	0.558
	7.5	2.531		0.583	0.08	0.15	0.24	3	1.172	0.868	0.552
	10	2.492		0.599	0.08	0.16	0.27	3.375	1.185	0.871	0.569

Caoutchouc	Rc %	1.07	4		0.29	0.9	2.14	7.379	1.305		
------------	---------	------	---	--	------	-----	------	-------	-------	--	--

## **2.4. Procédure de l'essai**

### **2.4.1 Introduction**

Le choix de la boîte de cisaillement "Casagrande" est conditionné par la nature du sol soumis au test. Pour les échantillons de sable-caoutchouc pulvérulents, il est préconisé d'opter pour une boîte de section intérieure carrée, tandis que pour les sols cohérents, une boîte circulaire s'avère plus appropriée. La largeur ou le diamètre intérieur de la boîte doit excéder 5 cm, tout en ne descendant jamais en dessous de dix fois le diamètre équivalent des plus grosses particules dans le cas des sables. Typiquement, une boîte de cisaillement carrée de 6 cm de côté est utilisée pour les sables. Il est également essentiel de prélever une quantité d'échantillon adéquate afin de réaliser au moins trois essais avec des charges distinctes.

### **2.4.2 Reconstitution de l'échantillon**

Les mélanges étudiés ont été élaborés en laboratoire avec des fractions de caoutchouc variant de 0 % à 2.5%, 5 %, 7.5 % et 10 %. Les échantillons ont été confectionnés selon la méthode de pluviation à sec, en maintenant une densité relative dense de 90 %. Par la suite, ces échantillons ont été soumis à trois contraintes normales distinctes (100 kPa, 200 kPa et 400 kPa).



Figure 2.8: illustre la procédure de préparation des échantillons.

Pour déterminer la quantité de matériau correspondant aux différents états, nous nous appuyons sur l'utilisation des paramètres suivants : la densité relative ( $D_r$ ), ainsi que les indices de vides minimum ( $e_{min}$ ) et maximum ( $e_{max}$ ).

$$\longrightarrow D_r = \frac{(e_{max} - e)}{(e_{max} - e_{min})}, e = e_{max} - D_r \times (e_{max} - e_{min})$$

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

$$\gamma_d = \frac{W_{sol}}{V_{moule}} \longrightarrow W_{sol} = \gamma_d \times V_{moule} \text{ (Le volume du moule est } 90 \text{ cm}^3\text{).}$$

Ou bien :

$$\longrightarrow D_r = \frac{(e_{max} - e)}{(e_{max} - e_{min})}, e = e_{max} - D_r \times (e_{max} - e_{min}) \dots \dots \dots [1]$$

$$e = (V_t / V_s) - 1 = [V_t \times \gamma_s / W_{sol}] - 1 \dots \dots \dots [2]$$

( $V_t$ =volume du moule et  $90 \text{ cm}^3$ ).

$$[1] = [2] \longrightarrow [V_t \times \gamma_s / W_{sol}] = 1 + e_{max} - D_r \times (e_{max} - e_{min})$$

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

Dans cette recherche expérimentale Les masses des matériaux étudiés et qui reconstitués par la méthode de pluviation à sec est présenté dans le tableau (2.2) :

**Tableau 2.2** : Les masses calculées pour les mélanges préparés par pluviation à sec

<b>Matériaux</b>	<b>Sable</b>	<b>Densité relative, <math>D_r</math> (%)</b>	<b>Masse de sol (gr)</b>
<b>RC=0%</b>	Chlef	90	158.06
	Concaser	90	159.06
	Dune	90	146.59
<b>RC=2.5%</b>	Chlef	90	153.01
	Concaser	90	153.71
	Dune	90	146.1
<b>RC=5%</b>	Chlef	90	148.89
	Concaser	90	148.36
	Dune	90	145.67
<b>RC=7.5%</b>	Chlef	90	150.29
	Concaser	90	147.93
	Dune	90	148.33
<b>RC=10%</b>	Chlef	90	142.92
	Concaser	90	137.89
	Dune	90	140.27

### 2.4.3 Mise en place de l'échantillon dans la boîte

Une fois les deux demi-boîtes verrouillées, les éléments suivants sont placés successivement :

Le fond de la boîte ;

Une pierre poreuse ;

Une plaque striée (composée de pierre poreuse et d'un piston), avec des stries perpendiculaires au sens du cisaillement (les plaques perforées sont utilisées pour les essais drainés, tandis que les plaques pleines le sont pour les essais non drainés) ;

L'échantillon de sol.

### 2.4.4 Mise en place de la boîte sur la machine

Positionner l'étrier de charge sur le piston de la boîte ;

Placer le comparateur vertical et le calibrer à zéro ;

Installer l'anneau dynamométrique sur la machine, le connecter à la boîte, et compenser les jeux en appliquant légèrement une traction sur l'anneau tout en ajustant progressivement le comparateur à zéro ;

Appliquer la charge souhaitée sur l'échantillon, selon les recommandations suivantes :

Pour un sol pulvérulent : 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa ;

Désolidariser les deux demi-boîtes en retirant les goupilles ;

Mettre la machine en marche à la vitesse désirée.

### 2.4.5 Lectures

Des capteurs et des contrôleurs sont employés afin de mesurer les déplacements horizontaux et verticaux, ainsi que les contraintes tangentielles, ces données étant enregistrées par le biais d'un système d'acquisition informatisé. L'essai est arrêté lorsque la contrainte de cisaillement devient stable ou lorsque la déformation horizontale atteint 7 mm.

## 2.5. Conclusion

## Chapitre 2 : Dispositif expérimental et procédure de l'essai

---

Ce chapitre a abordé l'équipement essentiel pour analyser le comportement mécanique des mélanges de trois types de sable (sable de Chlef " $D_{max}=2.00$  mm", sable concassé " $D_{max}=2.00$  mm" et sable de dune " $D_{max}=0.63$  mm") avec des fractions variables de caoutchouc ( $F_{bio} = 0$  %, 2.5%, 5%, 7.5% et 10 %). Les échantillons ont été préparés en laboratoire en utilisant la méthode de pluviation à sec avec une densité relative initiale dense ( $D_r = 90$  %) et ont été soumis à trois contraintes normales ( $\sigma_n = 100$  kPa, 200 kPa et 400 kPa) à l'aide d'un appareil de cisaillement direct. La procédure d'essai a été décrite en tenant compte de la composition des mélanges testés, ce qui a permis la fabrication d'échantillons homogènes et la réalisation d'essais de cisaillement direct. Les caractéristiques granulométriques et physiques des mélanges de sable et de caoutchouc ont également été présentées dans ce chapitre.

Les chapitres à venir se concentreront sur l'étude de la réponse mécanique des mélanges de sable avec différentes formes de grains et de caoutchouc, en mettant particulièrement l'accent sur l'impact de la forme des grains et de la fraction de caoutchouc sur leur comportement mécanique.

**CHAPITRE 3 : EFFET DE TENEUR EN  
GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA  
REPONSE MECANIQUE DES SOLS  
SABLEUX**

### **3.1. Introduction**

Des nombreuses études dans la littérature publiée se sont penchées sur l'influence granules de caoutchouc sur les caractéristiques mécaniques des sols granulaires. Anvari et al. (2017) ont étudié l'effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement du sable fin. Ils ont montré que la teneur en granulés de caoutchouc et la densité relative influencent le comportement contrainte-déplacement horizontal du mélange sable-granulés de caoutchouc. Ils ont observé un pic distinct sur les courbes contrainte-déplacement associé à l'état critique. L'ajout de granulés augmente la porosité du sable, ce qui explique probablement l'augmentation de la résistance au cisaillement par densification pendant le déplacement. Aksoy et al. (2021) ont étudié l'effet des granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement du sable à l'optimum Proctor. Ils ont montré qu'avec 5% de granulés, l'angle de frottement interne augmente de 13,8% tandis que la cohésion diminue de 66,4%. Au-delà, l'angle de frottement diminue et la cohésion augmente légèrement. Sung et al. (2022) ont évalué l'effet des granulés sur l'angle de frottement du sable. Pour les échantillons lâches, la résistance au cisaillement s'améliore avec les granulés jusqu'à 7,5%, atteignant un angle de frottement maximal de 38,0°, puis diminue légèrement à 10%. Pour les échantillons denses, l'angle de frottement (43,6° sans granulés) diminue avec l'ajout de granulés. Dans le cadre de cette étude, une série d'essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande a été menée pour analyser l'impact de l'ajout de granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique de trois types de sables distincts : sable de Chlef, sable de dune et sable concassé. Tous les mélanges sable-granulés ont été reconstitués au laboratoire par pluviation sèche pour obtenir une densité relative de 90%. Ils ont ensuite été soumis à des essais de cisaillement direct sous trois contraintes normales initiales différentes : 100, 200 et 400 kPa. Pour les trois types de sables, des essais ont également été réalisés en ajoutant des fibres de doum dans des proportions allant de 0 à 10% par incréments de 2,5%. L'objectif de cette étude est de combler un manque dans la recherche sur le renforcement par les granulés de caoutchouc, en caractérisant en détail l'effet de ces granulés sur la réponse mécanique de trois sables de formes différentes (Chlef, dune et concassé).

### **3.2. Résultats des essais réalisés**

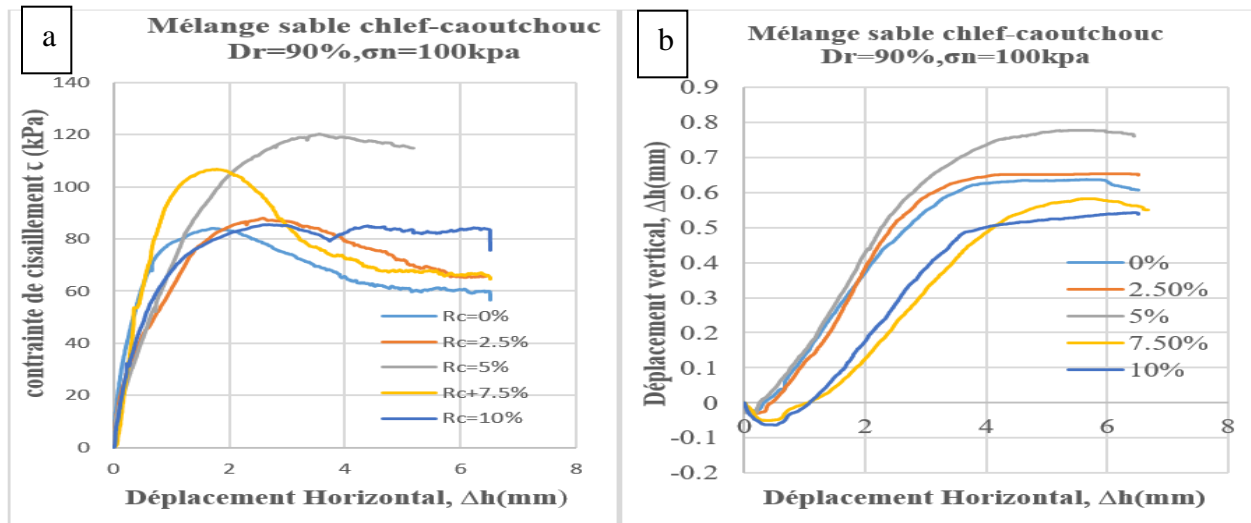
#### **3.2.1. Mélanges sable de Chlef-granules de caoutchouc**

L'étude a examiné l'influence de la teneur en granulés de caoutchouc ( $R_c=0\%$ , 2,5%, 5%, 7,5% et 10%) sur le comportement mécanique de Chlef (de forme semi-arrondi). Les échantillons ont été reconstitués par pluviation sèche à densité relative de 90% et soumis à trois contraintes normales initiales de 100, 200 et 400 kPa. Les figures 3.1 à 3.3 présentent les résultats des expériences menées dans le cadre de cette étude. Les résultats de cette étude montrent que la teneur en granulés de caoutchouc a un impact significatif sur la résistance au cisaillement de sable de Chlef étudié. On constate qu'ajouter des granulés jusqu'à une teneur seuil de 5% engendre une augmentation progressive de cette résistance par rapport au sable non renforcé, avec des gains respectifs de 41%, 23% et 21% pour les trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n=100, 200$  et 400 kPa), respectivement. Cependant, au-delà de cette teneur optimale de 5%, un comportement inverse est observé où la résistance au cisaillement diminue. En comparaison avec les échantillons contenant 5% de granulés, les mélanges dépassant ce seuil ( $R_c=10\%$ ) voient leur résistance chuter de 29%, 15% et 19% pour les trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n=100, 200$  et 400 kPa), respectivement. Ces résultats suggèrent donc qu'incorporer des granulés de caoutchouc jusqu'à 5% permet d'améliorer la résistance de sable de Chlef à densité élevée, mais que dépasser ce seuil a l'effet inverse et devient défavorable. Cette tendance peut être expliquée par l'effet de perte de frottement intergranulaire. Au-delà d'une teneur de  $R_c=5\%$ , les granulés de caoutchouc commencent à remplacer de façon trop importante les grains de sable. Le frottement intergranulaire sable-sable, qui contribue grandement à la résistance du matériau, se trouve alors fortement diminué au profit d'un frottement sable-granulés moins efficace. De plus, une trop grande quantité de granulés peut empêcher la formation d'une structure granulaire dense et réduire les contacts intergranulaires en perturbant l'arrangement des grains de sable.

Il est clairement observé dans les Figures (3.1b, 3.2b and 3.3b) que la présence de granulés de caoutchouc a une influence significative sur le comportement mécanique de sable de Chlef. Les résultats obtenus confirment que la fraction de granulés de caoutchouc ( $R_c = 0\%$ , 2.5%, 5%, 7.5% et 10%) joue un rôle important, car la phase de dilatance augmente progressivement à mesure que la fraction de granulés en caoutchouc augmente à ( $R_c=5\%$ ). En outre, une augmentation de la fraction de granulés de caoutchouc au-delà de ( $R_c=5\%$ ) entraîne une

### Chapitre 3: Effet de teneur en granules de caoutchouc sur la réponse mécanique des sols sableux

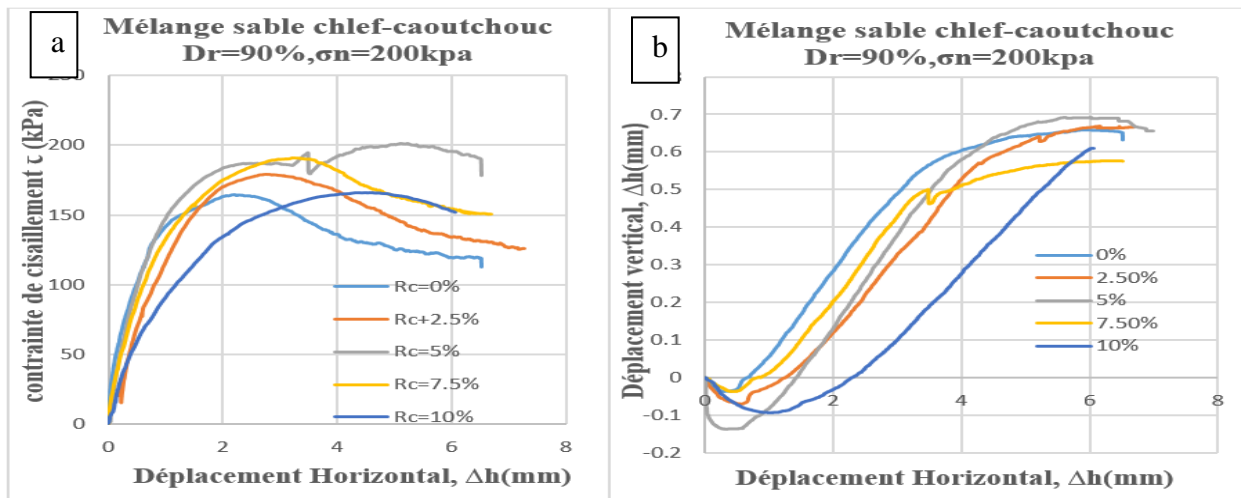
diminution de la phase de dilatance, qui est associée à une diminution de la résistance au cisaillement.



a) Evolution de la contrainte de cisaillement

b) Evolution de déplacement vertical

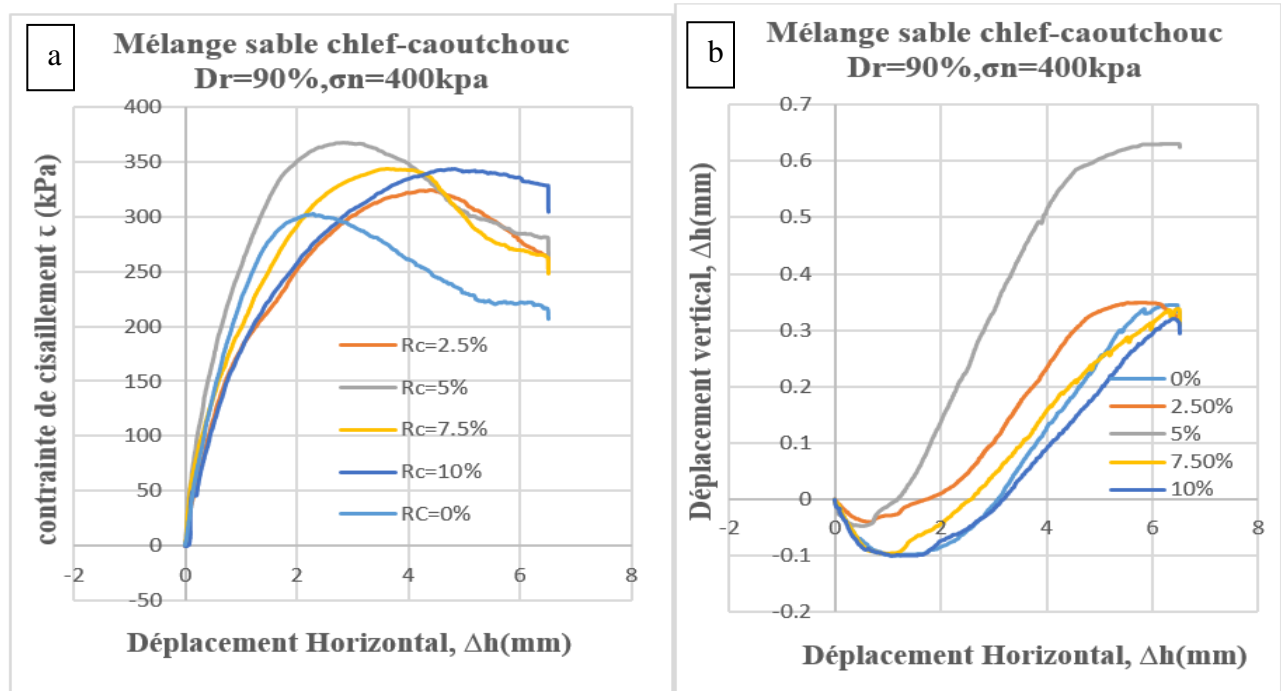
**Figure 3.1** : Comportement mécanique des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc; ( $\sigma_n = 100$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement , b) Evolution de déplacement vertical



a) Evolution de la contrainte de cisaillement

b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 3.2:** Comportement mécanique des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc; ( $\sigma_n = 200$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

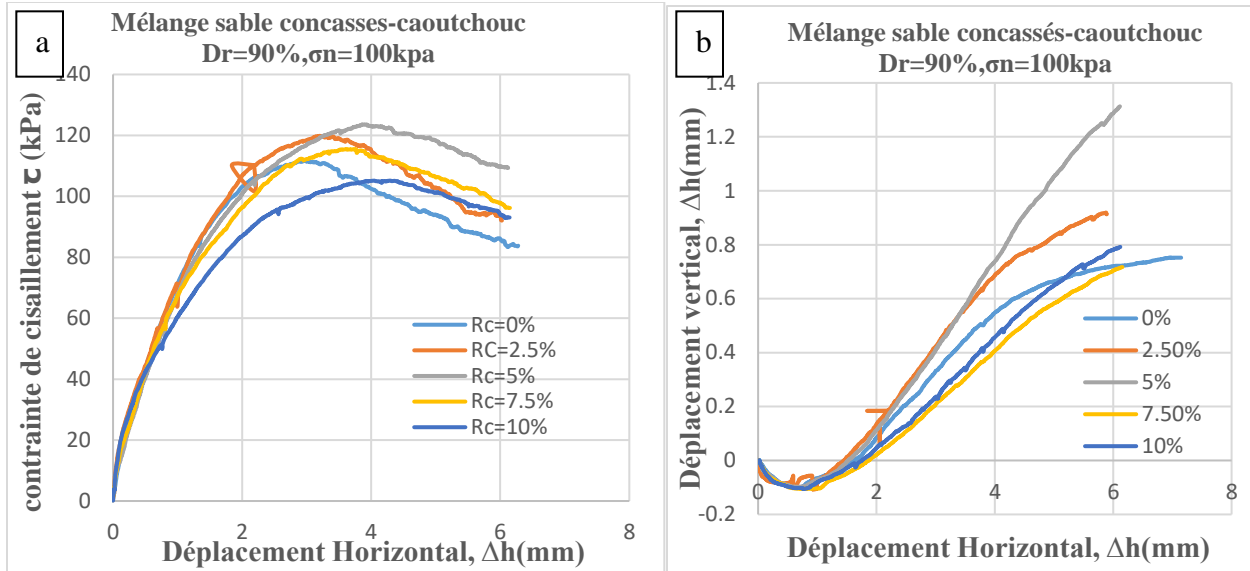
**Figure 3.3:** Comportement mécanique des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc; ( $\sigma_n = 400$  kPa), a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical

### 3.2.2. Mélanges sable de concassé-granules de caoutchouc

Une série d'essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande a été réalisée afin d'étudier l'impact de la teneur en granules de caoutchouc sur la résistance au cisaillement de sable concassé (anguleux). Les Figure 3.4, 3.5 et 3.6 présentent les résultats obtenus pour cette section. Les échantillons de mélanges de concassé-granulés de caoutchouc ont été reconstitués au laboratoire par pluviométrie à sec avec différentes teneurs en granules de caoutchouc de ( $R_c=0\%$ , 2,5%, 5%, 7,5% et 10%). Une densité relative initiale  $Dr=90\%$  a été utilisée et les échantillons ont été soumis à trois contraintes normales initiales  $\sigma_n = 100, 200$  et 400 kPa. Les résultats indiquent que l'augmentation de la teneur en granules en caoutchouc influence remarquablement

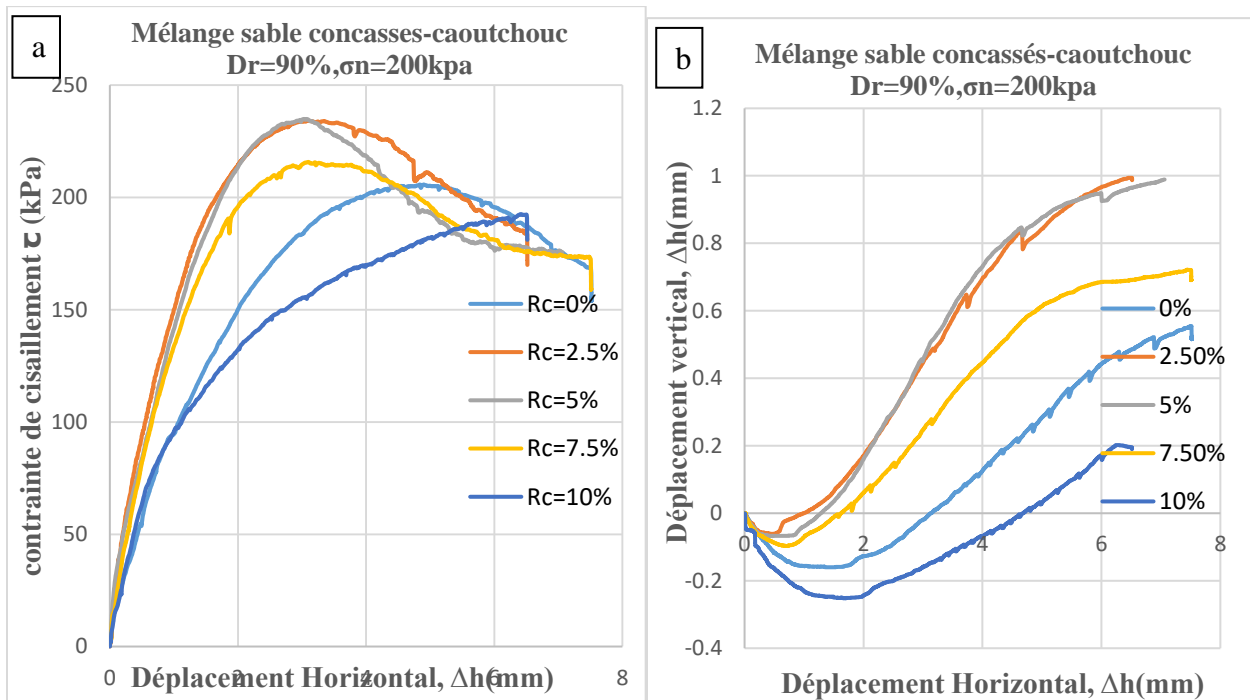
la résistance au cisaillement pour les mélanges de sable concassé-granulés de caoutchouc étudiés. De plus, d'après les Figures 3.4a, 3.5a et 3.6a, l'incrément de la teneur en granulés en caoutchouc induit généralement une augmentation de la résistance au cisaillement jusqu'à une teneur en granulés en caoutchouc limite de ( $R_c = 5\%$ ); ( $\tau_{pic} = 111.75$  kPa pour  $R_c = 0\%$ ,  $\tau_{pic} = 119.86$  kPa pour  $R_c = 2.5\%$  et  $\tau_{pic} = 123.63$  kPa pour  $R_c = 5\%$ ), ( $\tau_{pic} = 205.69$  kPa pour  $R_c = 0\%$ ,  $\tau_{pic} = 234.11$  kPa pour  $R_c = 2.5\%$  et  $\tau_{pic} = 234.99$  kPa pour  $R_c = 5\%$ ) et ( $\tau_{pic} = 351.16$  kPa pour  $R_c = 0\%$ ,  $\tau_{pic} = 377.02$  kPa pour  $R_c = 2.5\%$  et  $\tau_{pic} = 431.25$  kPa pour  $R_c = 5\%$ ), considérant les trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n = 100, 200$  et  $400$  kPa). Au-delà de cette teneur en granulés de caoutchouc, la tendance inverse a été observée ( $R_c > 5\%$ ), ou l'augmentation du pourcentage de granulés de caoutchouc induit une diminution de résistance au cisaillement pour tous les paramètres testés ( $\tau_{pic} = 115.52$  kPa pour  $R_c = 7.5\%$ ,  $\tau_{pic} = 105.13$  kPa pour  $R_c = 10\%$ ), ( $\tau_{pic} = 215.8$  kPa pour  $R_c = 7.5\%$ ,  $\tau_{pic} = 192.52$  kPa pour  $R_c = 10\%$ ) et ( $\tau_{pic} = 364.3$  kPa pour  $R_c = 7.5\%$ ,  $\tau_{pic} = 363.88$  kPa pour  $R_c = 10\%$ ) en prenant en compte les trois mêmes contraintes normales initiales ( $\sigma_n = 100, 200$  et  $400$  kPa), respectivement.

Il est clairement démontré par la figure 3.4b, 3.5b and 3.6b que la présence de fraction de granulés de caoutchouc a une influence significative sur le comportement mécanique de ce sable. Les résultats obtenus confirment que la teneur en granulés ( $R_c = 0\%, 2.5\%, 5\%, 7.5\%$  et  $10\%$ ) joue un rôle clé, car on observe une augmentation progressive de la phase de dilatance à mesure que cette fraction augmente jusqu'à un optimum de  $R_c = 5\%$ . Cependant, au-delà de cette teneur seuil de  $5\%$ , l'ajout supplémentaire de granulés entraîne un effet inverse avec une diminution de la phase de Dilatance, qui se traduit alors par une diminution de la résistance au cisaillement du mélange par rapport au comportement optimal obtenu à  $R_c = 5\%$ .



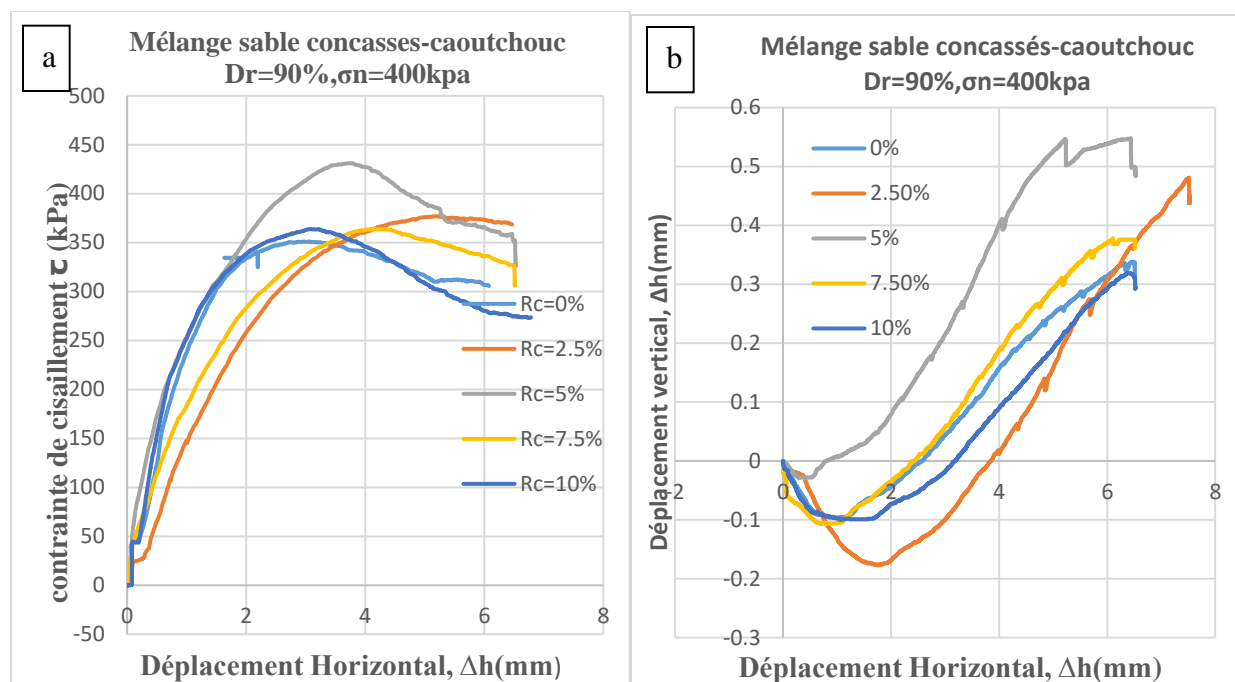
a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 3.4:** Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;( $\sigma_n = 100$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement ,b) Evolution de déplacement vertical



a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 3.5:** Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;( $\sigma_n = 200$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement ,b) Evolution de déplacement vertical



a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 3.6:** Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;( $\sigma_n= 400$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical

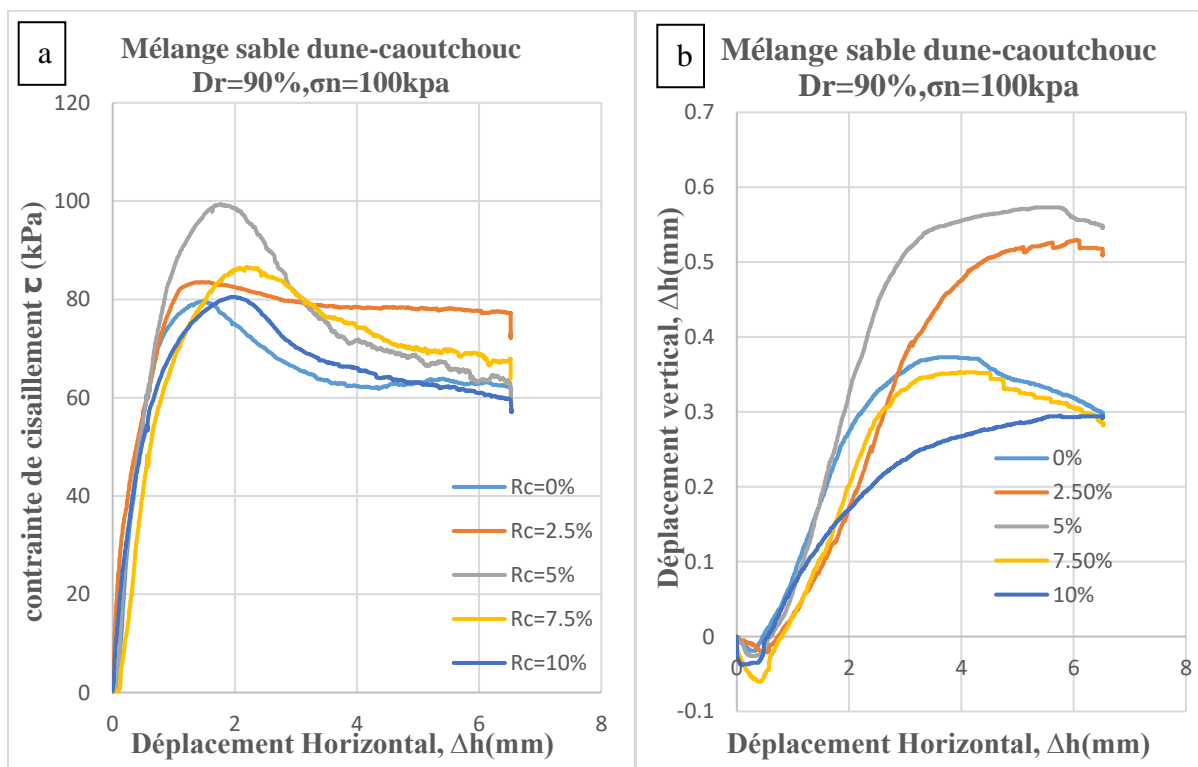
### 3.2.3. Mélanges sable de dune-granules de caoutchouc

Les Figures 3.7, 3.8 et 3.9 indiquent l'influence de la teneur en granules de caoutchouc ( $R_c=0\%$ , 2,5%, 5%, 7,5% et 10%) sur le comportement mécanique de sable de dune de forme sphérique. Les échantillons ont été préparés par pluviation à sec à une densité relative de 90% et soumis à trois contraintes normales initiales de 100, 200 et 400 kPa. Les résultats de cette étude révèlent l'impact significatif de la teneur en granules de caoutchouc sur la résistance au cisaillement de ce sable à l'état dense. L'ajout de granules jusqu'à une teneur optimale de 5% entraîne une augmentation progressive de cette résistance par rapport au sable non renforcé, avec des gains respectifs de 25%, 13% et 17% pour trois contraintes normales (100, 200 et 400 kPa), respectivement. Cependant, au-delà de ce seuil de 5%, une tendance inverse est observée où la résistance au cisaillement diminue. Comparativement aux échantillons contenant 5% de granules, les mélanges dépassant ce seuil ( $R_c=10\%$ ) voient leur résistance chuter de 18%, 10% et 9% pour les mêmes contraintes normales initiales ( $\sigma_n=100, 200$  et 400 kPa), respectivement. Ces résultats suggèrent que l'incorporation de granules de caoutchouc jusqu'à 5% améliore la résistance de

### Chapitre 3: Effet de teneur en granules de caoutchouc sur la réponse mécanique des sols sableux

sable de dune, mais que dépasser ce seuil entraîne un effet inverse et devient défavorable. Cette tendance peut s'expliquer par l'effet de perte de frottement intergranulaire. Au-delà d'une teneur en granules de 5%, ces derniers commencent à remplacer de manière prépondérante les grains de sable. Le frottement intergranulaire sable-sable, qui contribue largement à la résistance du matériau, est alors considérablement réduit au profit d'un frottement sable-granulés moins efficace. De plus, une quantité excessive de granules peut perturber la formation d'une structure granulaire dense et réduire les contacts intergranulaires, nuisant à l'arrangement des grains de sable.

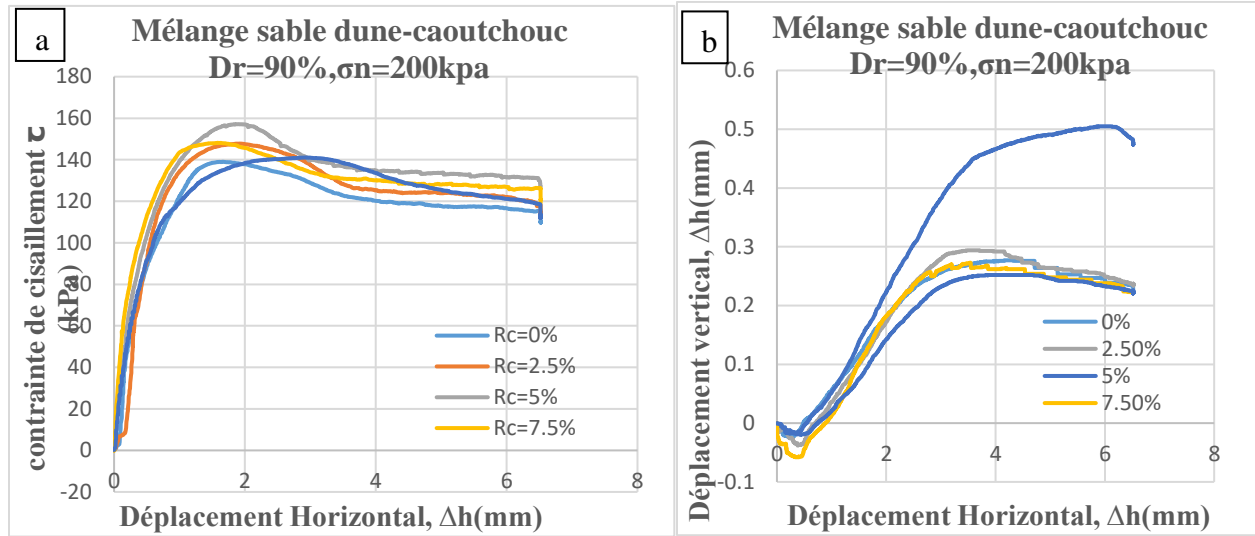
Les figures 3.7b, 3.8b et 3.9b montrent clairement que la teneur en granules de caoutchouc influence significativement le comportement mécanique de sable de dune. Jusqu'à une teneur optimale de 5%, l'augmentation de la fraction de granules engendre une phase de dilatance progressive, améliorant la résistance au cisaillement. Cependant, au-delà de 5%, l'ajout de granules supplémentaires à l'effet inverse et réduit la dilatance ainsi que la résistance au cisaillement.



a) Evolution de la contrainte de cisaillement

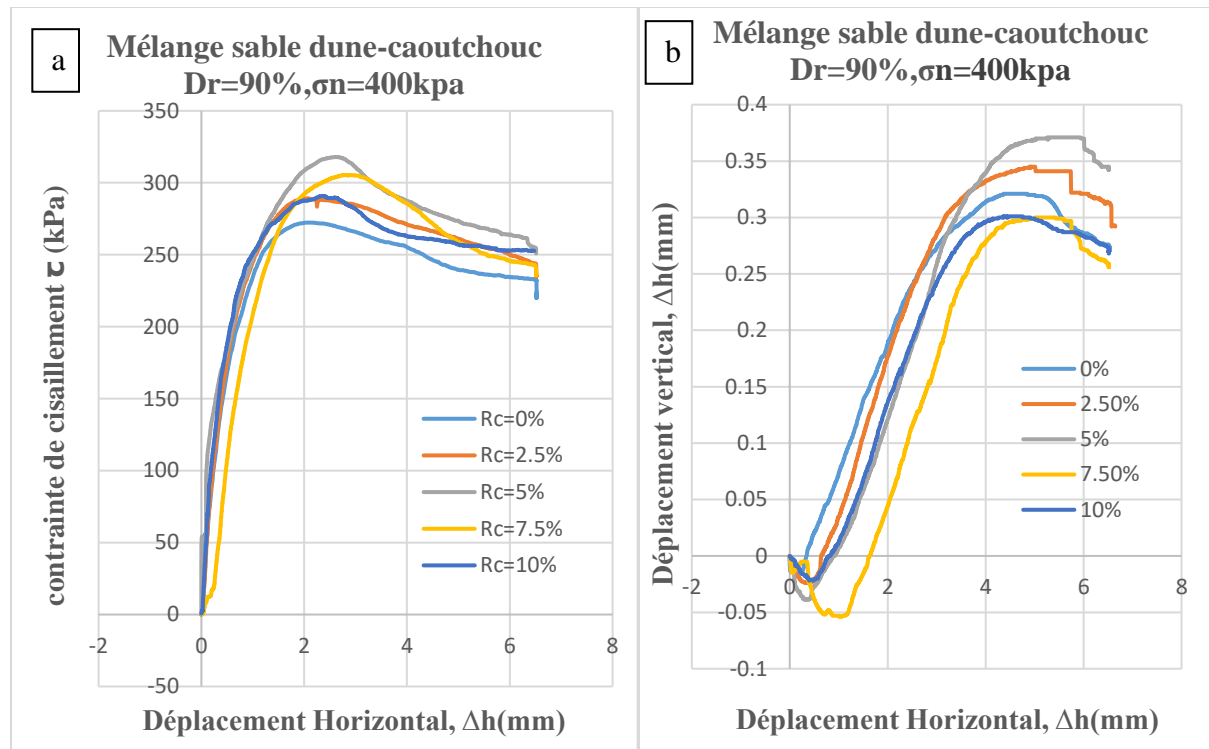
b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 3.7:** Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;( $\sigma_n= 100$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 3.8:** Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;( $\sigma_n= 200$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

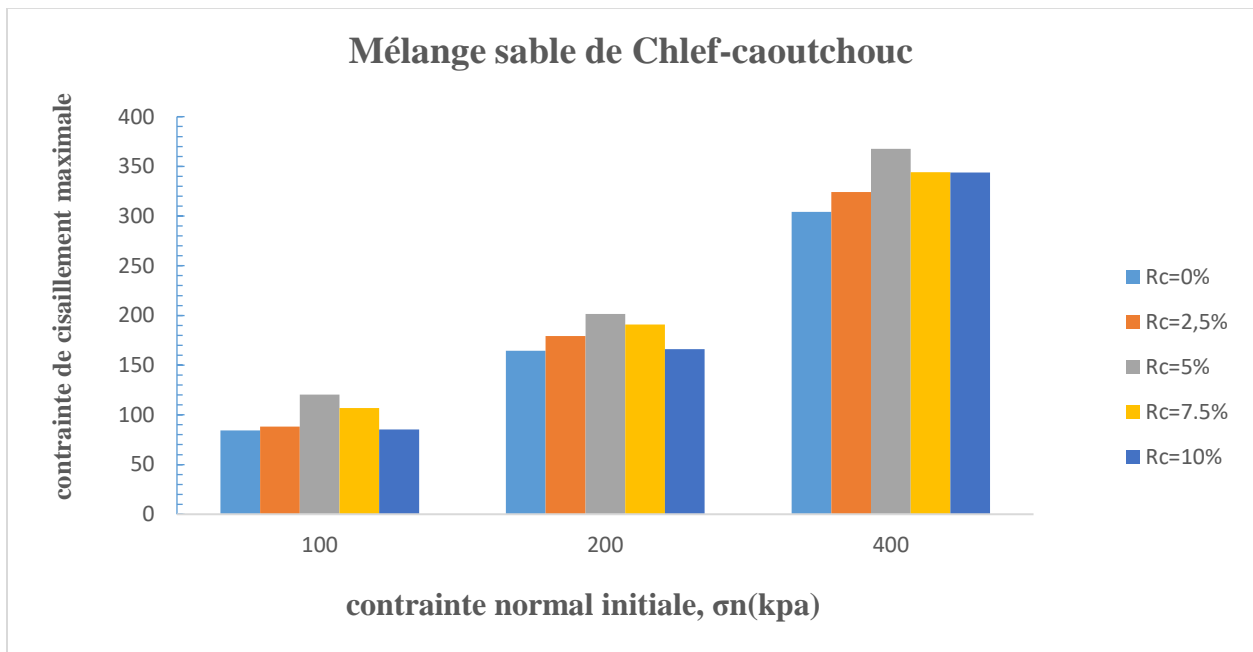
**Figure 3.9:** Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;( $\sigma_n = 400 \text{ kPa}$ ). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical

### 3.3. Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement maximale

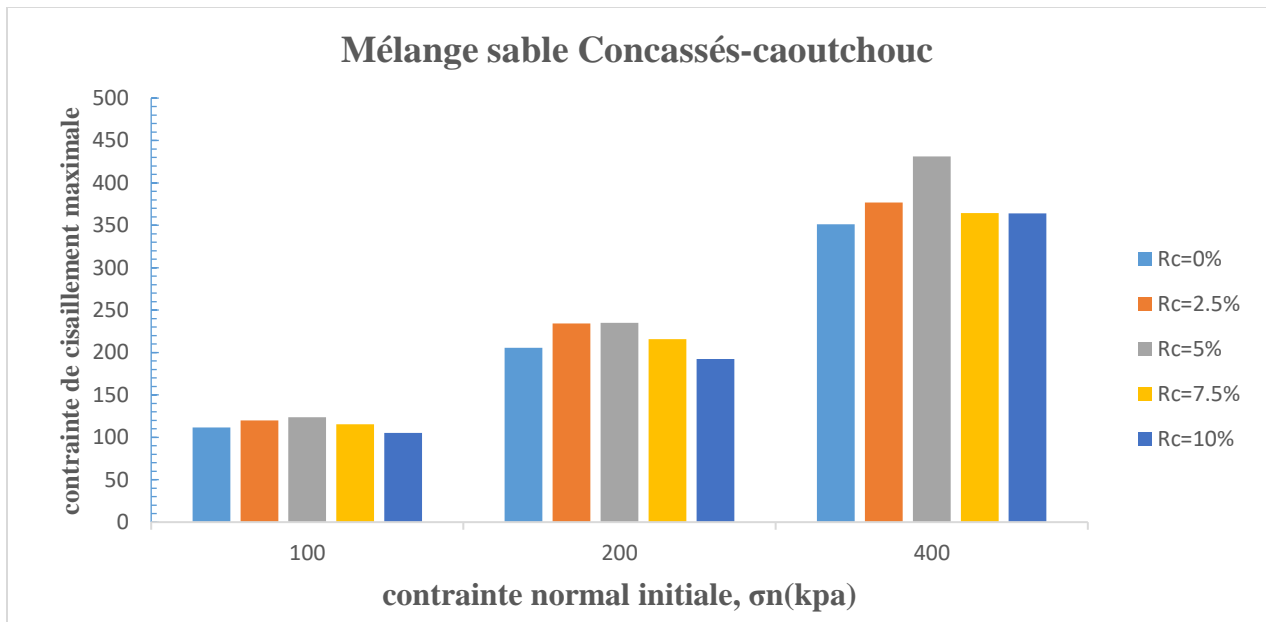
La Figure 3.4 présente une reproduction des résultats des Figures 3.1 et 3.3, dans le but d'évaluer l'effet de la teneur en granulés de caoutchouc ( $R_c$  variant de 0% à 10%) sur la résistance au cisaillement maximale des mélanges de trois types de sables (Chlef, dune et concassé) avec ces fibres. Les échantillons, préparés à une densité relative initiale  $D_r = 90\%$  (état dense), ont été soumis à trois contraintes normales  $\sigma_n$  de 100, 200 et 400 kPa. À partir de l'histogramme représenté sur la figure 3.4, on constate que la teneur en granulés de caoutchouc joue un rôle crucial dans l'amélioration de la résistance au cisaillement des sols sableux. De plus, la résistance au cisaillement maximale augmente avec l'accroissement de la teneur en granulés de caoutchouc jusqu'à une fraction limite de  $R_c = 5\%$ , pour les trois contraintes normales initiales considérées

### Chapitre 3: Effet de teneur en granules de caoutchouc sur la réponse mécanique des sols sableux

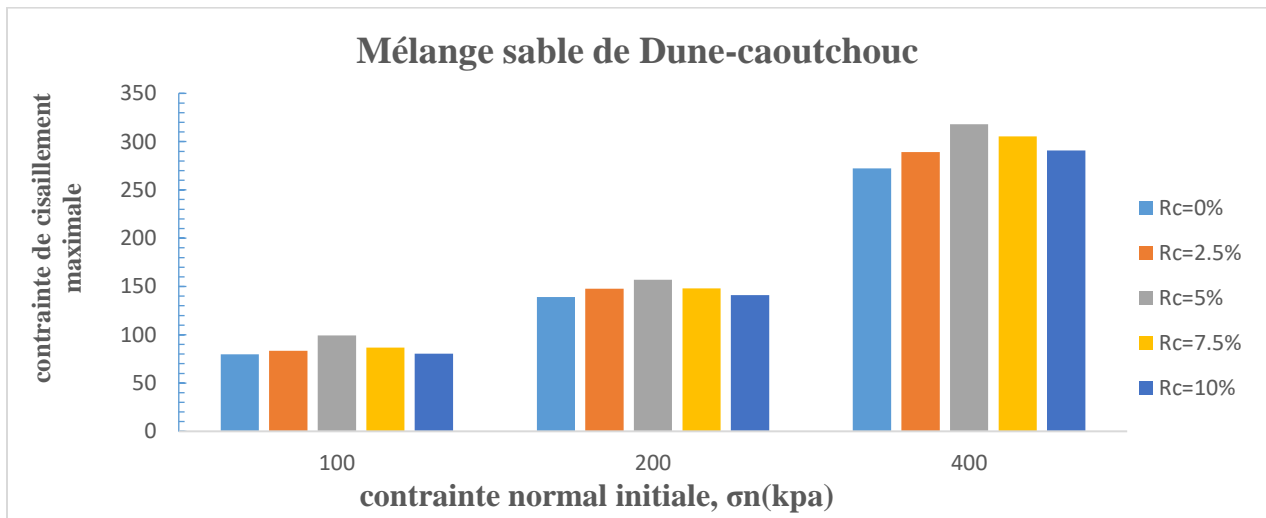
( $\sigma_n = 100, 200$  et  $400$  kPa), pour les trois mélanges étudiés (sable de Chlef-granulés de caoutchouc, sable de dune-granulés de caoutchouc et sable concassé-granulés de caoutchouc). Au-delà de ces seuils, l'augmentation de la fraction de granulés de caoutchouc entraîne une diminution de la résistance au cisaillement maximale pour les trois mélanges étudiés, pour les trois contraintes normales initiales considérées. Avec l'augmentation de la contrainte normale initiale, le potentiel d'amélioration de la résistance au cisaillement maximale croît avec l'accroissement de la teneur en granulés de caoutchouc jusqu'à ( $R_c=5\%$ ), pour tous les paramètres considérés.



(a)



(b)



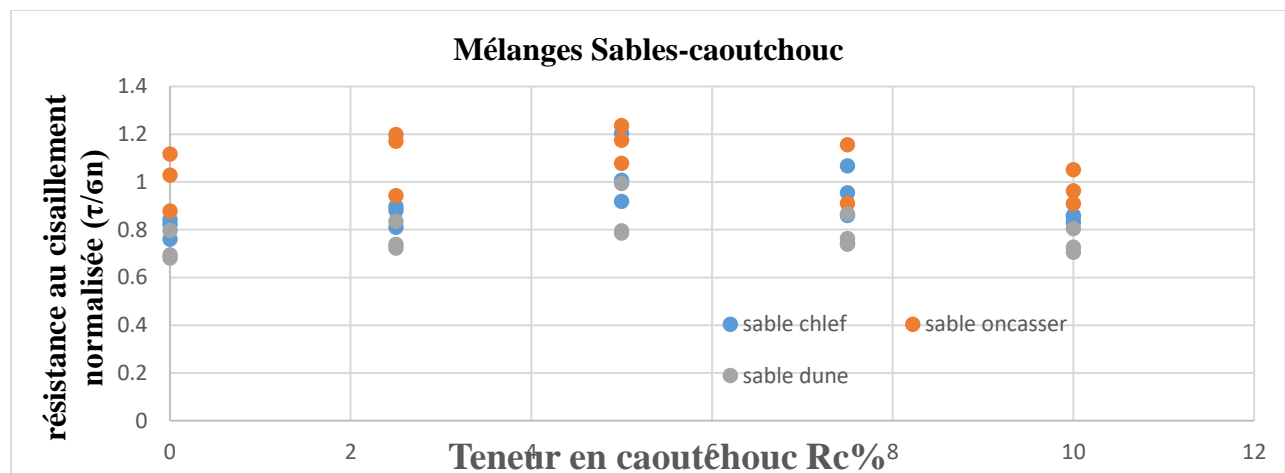
(c)

**Figure 3.10:** Résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte normale initiale

(a)-Mélange sable de Chlef-granulés de caoutchouc ,(b)- Mélange sable de dune-granulés de caoutchouc ,(c) Mélange sable concassé-granulés de caoutchouc .

### 3.4. Effet de la teneur en granules de caoutchouc sur la résistance au cisaillement normalisée

La Figure 3.5 présente l'effet de la teneur en granules de caoutchouc sur la variation de la résistance au cisaillement maximale normalisée ( $\tau_{\max}/\sigma_n$ ) de deux mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc, sable de dune-granulés de caoutchouc et sable concassé-granulés de caoutchouc, avec des fractions variant de  $R_c=0\%$  à  $10\%$  par incréments de  $2.5\%$ . Les mélanges ont été reconstitués à une densité relative initiale ( $Dr=90\%$ ). À partir de cette figure, on constate que la résistance au cisaillement maximale normalisée augmente avec l'augmentation de la teneur en granules de caoutchouc jusqu'à un seuil de  $R_c=5\%$  pour les trois mélanges considérés, avec une densité relative de  $90\%$ . Cependant, une tendance inverse est observée lorsque la teneur en granules de caoutchouc dépasse ce seuil pour tous les paramètres examinés. De plus, une relation polynomiale peut exprimer la corrélation entre la résistance au cisaillement maximale normalisée et la teneur en granules de caoutchouc pour les matériaux testés (sable de Chlef, dune et concassé). Par ailleurs, il est clairement observé que la résistance au cisaillement normalisée des mélanges sable concassé-granulés de caoutchouc est nettement plus prononcée que celle des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc et sable de dune-granulés de caoutchouc. Cette observation s'explique par la morphologie plus anguleuse du sable concassé, associée à une meilleure compacité et adhérence entre les granules de caoutchouc et les grains de sable. Cette combinaison permet une exploitation plus efficace du potentiel de renforcement offert par les granules de caoutchouc, se traduisant par des gains de résistance au cisaillement normalisée plus significatifs.



**Figure 3.11:** Impact de la teneur en granules de caoutchouc sur résistance au cisaillement normalisée ( $\tau/\sigma_n$ ) des mélanges étudiés.

### **3.5. Effet de la teneur en granules de caoutchouc sur l'angle de frottement**

Dans le cadre de cette étude, l'impact de la fraction de granules en caoutchouc sur l'angle de frottement interne de trois types de sables (Chlef, dune et concassé) a été évalué. Les échantillons ont été mélangés avec du caoutchouc dans une plage de 0% à 10%, pour trois contraintes normales différentes ( $\sigma_n=100, 200$  et  $400$  kPa), avec des incréments de 2.5%. Les mélanges des sables (Chlef, dune et concassé) - granules de caoutchouc ont été préparés avec une densité relative initiale ( $D_r=90\%$ ). Les observations indiquent que l'augmentation de la teneur en caoutchouc entraîne généralement une augmentation de l'angle de frottement jusqu'à un seuil de 5% de caoutchouc pour chaque mélange, à savoir le mélange de sable de Chlef-granules de caoutchouc, le mélange de sable de dune-granules de caoutchouc et le mélange de sable concassé-granules de caoutchouc. Cependant, au-delà de ces seuils, une tendance inverse a été observée pour tous les paramètres testés. Par exemple, une fraction de 10% de granules de caoutchouc a entraîné une diminution notable de l'angle de frottement par rapport aux échantillons contenant 5% et 7.5% de granules de caoutchouc, pour les trois mélanges étudiés. De plus, une excellente corrélation a été observée entre l'angle de frottement et la teneur en caoutchouc, avec un coefficient de détermination ( $R^2$ ) élevé pour chaque mélange considéré, à savoir ( $R^2=...$ ) pour le mélange sable de Chlef-granules de caoutchouc, ( $R^2=...$ ) pour le mélange sable de dune-granules de caoutchouc et ( $R^2=...$ ) pour le mélange sable concassé-granules de caoutchouc, en prenant en compte tous les paramètres examinés, l'équation suivante est proposée pour exprimer l'évolution de l'angle de frottement ( $\phi$ ) en fonction de la teneur en granules de caoutchouc ( $R_c$ ).

$$(\phi) = A \times (R_c)^2 + B \times (R_c) + C$$

Le tableau 3.1 illustre les coefficients A, B, C et coefficient de détermination ( $R^2$ ) pour les matériaux testés.

**Tableau 3.1 :** Coefficients A, B, C et  $R^2$  pour équation (3.1)

Mélanges	A	B	C	R <sup>2</sup>
Sable de dune-granulés de caoutchouc	-0.0855	1.1237	32.687	0.9706
Sable de chlef- granulés de caoutchouc	-0.0733	0.9578	35.95	0.8499
Sable concassé- granulés de caoutchouc	-0.1401	1.5763	38.105	0.3918

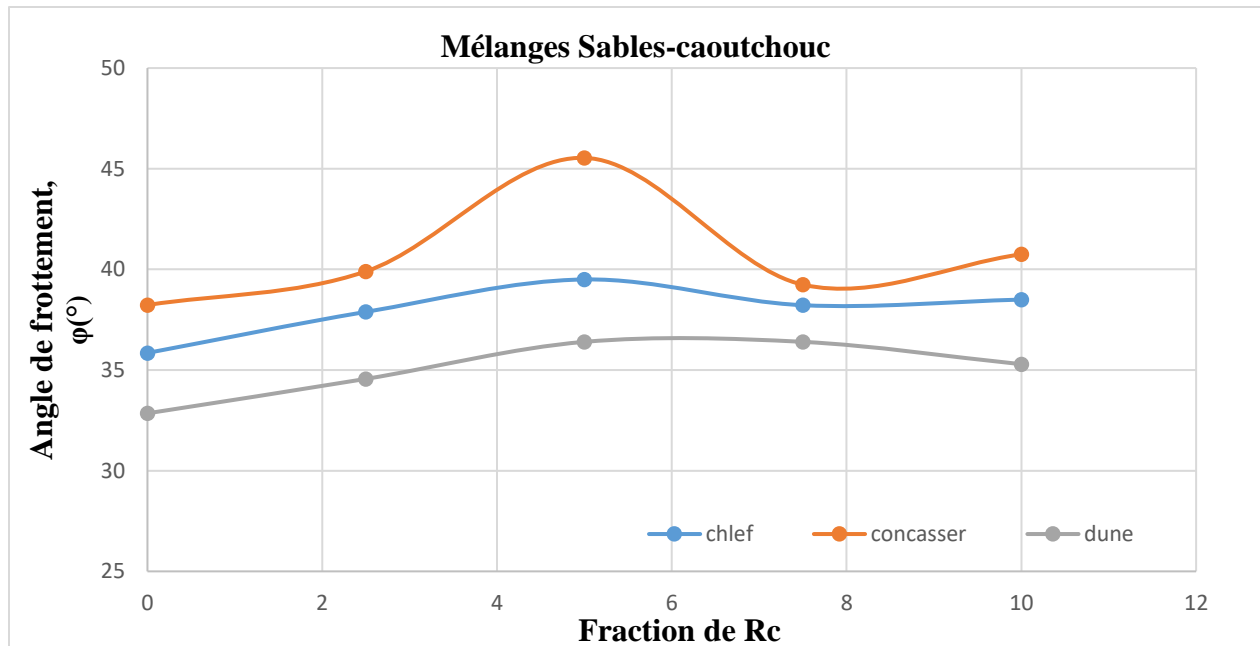


Figure 3.12 :Angle de frottement en fonction de teneur en granulés de caoutchouc pour les matériaux étudiés.

#### **3.6. Conclusion**

Ce chapitre se penche sur l'impact de la présence de granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique des échantillons de sable de Chlef, de sable de dune et de sable concassé. Les échantillons ont été préparés en utilisant la technique de la pluviation à sec afin d'atteindre une densité relative initiale de 90%. Par la suite, ils ont été soumis à des essais de cisaillement direct sous trois niveaux de contraintes normales initiales différents : 100, 200 et 400 kPa. Des quantités croissantes de granulés de caoutchouc, variant de 0% à 10% avec un pas de 2.5%, ont été ajoutées aux échantillons de sable pour chacune des trois contraintes normales appliquées.

Les résultats des essais réalisés sur divers mélanges révèlent que l'intégration de granulés de caoutchouc exerce un impact significatif sur les propriétés mécaniques des sols sableux, notamment le sable de Chlef, le sable dune et le sable concassé. Ces effets se manifestent principalement dans l'amélioration de la résistance maximale au cisaillement, de la résistance maximale au cisaillement normalisée et de l'angle de frottement. Ces constatations soulignent l'importance cruciale des granulés de caoutchouc dans le renforcement et l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols sableux. Par ailleurs, il a été observé que la résistance maximale au cisaillement augmente proportionnellement à la quantité de granulés de caoutchouc ajoutée, atteignant un seuil significatif pour une proportion de  $R_c=5\%$  dans les mélanges étudiés. Cependant, au-delà de ce seuil, une tendance inverse est constatée pour tous les échantillons examinés.

D'après les observations, il est clair que l'augmentation de la proportion de granulés de caoutchouc entraîne généralement une augmentation de l'angle de frottement, atteignant un point critique à une fraction de  $R_c=5\%$  pour les mélanges de sable de Chlef-granulés de caoutchouc, de sable dune-granulés de caoutchouc et de sable concassé-granulés de caoutchouc, en tenant compte de tous les paramètres considérés. Cependant, au-delà de ce seuil, une tendance inverse est observée. De plus, une relation polynomiale peut être établie entre l'angle de frottement et la proportion de granulés de caoutchouc, en tenant compte de tous les paramètres examinés, offrant ainsi une corrélation significative entre ces deux variables.

**CHAPITRE 4 : EFFET DE LA FORME DES  
PARTICULES SUR LA CARACTERISATION  
MECANIQUE DES MELANGES SABLE-  
GRANULES DE CAOUTCHOUC**

## **4.1. Introduction**

La forme des grains est un paramètre important dans l'étude du comportement mécanique des sols granulaires, avec des nombreuses recherches citées dans la littérature publiée. Holtz et Gibbs (1956) ont trouvé que les matériaux ayant une forme anguleuse sont plus résistants au cisaillement par rapport aux matériaux semi-anguleux et semi-arrondis. Santamarina et Cho (2001) ont montré que la réponse mécanique des sables est largement influencée par l'angularité, ou la résistance au cisaillement au pic augmente avec l'augmentation d'angularité. De plus, Guo et al. (2007) ont montré que l'angularité avait un effet très significatif sur les angles de frottement des sables. Tsomokos et al. (2009) ont observé une réponse au cisaillement plus stable dans les sables anguleux par rapport aux sables arrondis. Cherif Taiba et al. (2018) ont réalisé des essais non drainés sur des mélanges de sables de différentes formes de grains : le sable de Chlef (Algérie) de forme semi-arrondie, le sable de Fontainebleau (France) de forme semi-arrondie et le sable d'Hostun (France) de forme semi-anguleuse. Ils ont ajouté une fraction de fines peu plastiques ( $I_p=5\%$ ) variant de 0% à 40% par incréments de 10%. Leurs résultats ont révélé une diminution de la résistance au cisaillement non drainé des mélanges sable-limon avec la réduction de la sphéricité combinée et l'augmentation de l'angularité combinée du mélange sable-limon.

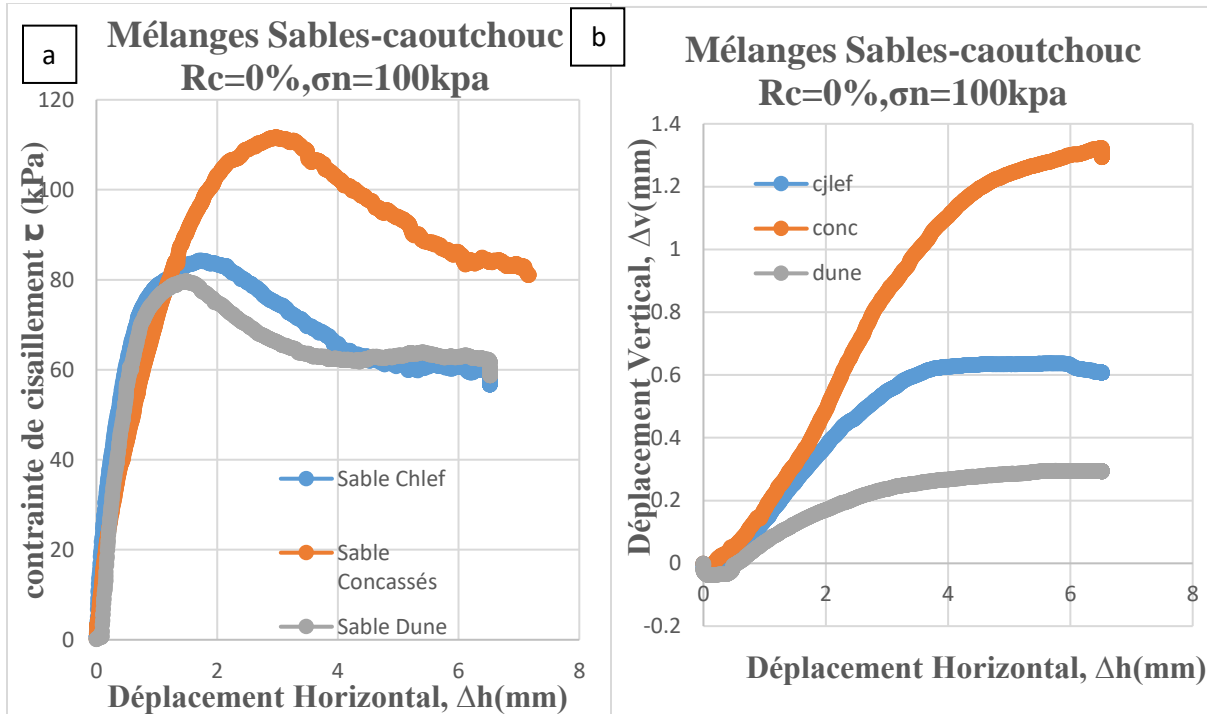
Nous présentons dans ce chapitre les résultats expérimentaux obtenus en étudiant l'influence de la forme des grains des sable (sable de Chlef, sable de dune et sable concassé) sur le comportement mécanique des mélanges de ces sables avec granules de caoutchouc, en utilisant la boîte de cisaillement direct. Les échantillons des différents de sables ont été reconstitués au laboratoire avec la de la pluviation à sec, contenant de 0 à 10% de granules de caoutchouc avec un intervalle d'augmentation de 2.5% à une densité relative initiale constante ( $D_{rse}=90\%$ ) et soumis à trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n= 100, 200$  et  $400$  kPa).

## **4.2. Résultats des essais réalisés**

### **4.2.1 Contrainte normale initiale faible, $\sigma_n=100$ kPa**

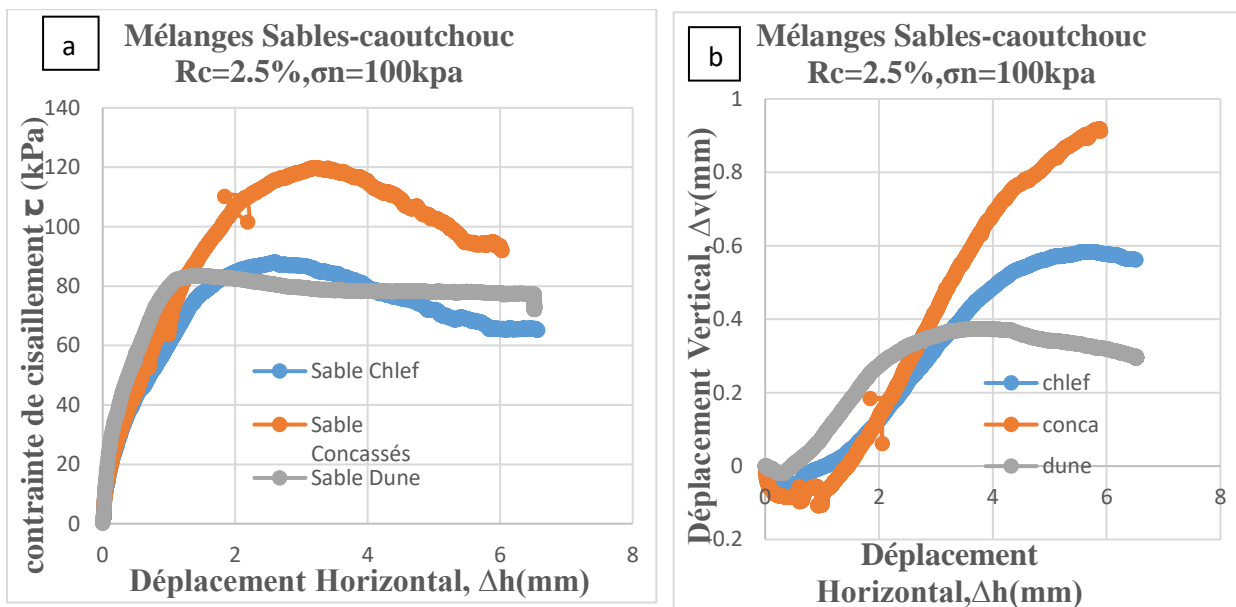
Les Figures 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 et 4.5 présentent les résultats des essais à la boîte de cisaillement direct effectués sur des différents sables (sable de Chlef d'une forme semi-arrondie, sable de dune une forme sphérique et sable de concassé d'une forme anguleuse) afin d'évaluer l'impact de la forme des grains (la forme des trois sables) sur le comportement mécanique des mélanges sable-granulés de caoutchouc. Les échantillons ont été reconstitués en laboratoire avec différentes fractions de granulés de caoutchouc ( $R_c=0\%$ , 2,5%, 5%, 7,5% et 10%) et soumis à une contrainte normale initiale de 100 kPa, avec une densité relative initiale dense ( $D_r = 90\%$ ). En général, les résultats des différents essais montrent clairement que le paramètre la forme des grains (sable de Chlef d'une forme semi-arrondie, sable de dune une forme sphérique et sable de concassé d'une forme anguleuse) a une influence significative sur le comportement mécanique des sables purs ainsi que des mélanges sable-granulés de caoutchouc. Les résultats obtenus indiquent que le sable concassé atteint une résistance au cisaillement élevée ( $\tau_{max} = 111.75$  kPa, 119.86 kPa, 123.63 kPa, 115.52 kPa et 105.13 kPa) en comparaison avec le sable de Chlef ( $\tau_{max} = 82.27$  kPa, 88.11 kPa, 120.44 kPa, 106.77 kPa et 85.41 kPa) et devient très prononcée par rapport le sable de dune ( $\tau_{max} = 79.66$  kPa, 83.52 kPa, 99.36 kPa, 86.61 kPa et 80.5 kPa) pour les cinq fraction de granules de caoutchouc ( $R_c=0$ , 2.5, 5, 7.5 et 10%), respectivement, comme illustré dans les (Figures 4.1a, 4.2a, 4.3a, 4.4a et 4.5a). Ce comportement est dû aux forces intergranulaire (enchevêtrement) produites par les grains anguleux (sable concassé) et semi-arrondie (sable de Chlef) entre eux et qui induisent une augmentation remarquable de la résistance au cisaillement par rapport aux échantillons ayant de forme semi-arrondie (sable de Chlef), et surtout aux échantillons avec des grains sphérique (sable de dune).

Le plan de déplacement vertical-horizontal montre clairement le rôle de la forme des grains de trois sables, que la forme des grains anguleuse (sable concassé) présente une augmentation importante de la phase de dilatance par rapport les grains semi-arrondie (sable de Chlef) et sphérique (sable de dune) pour les cinq teneurs en granules de caoutchouc considérés comme illustré sur les Figures (Figures 4.1b, 4.2b, 4.3b, 4.4b et 4.5b).



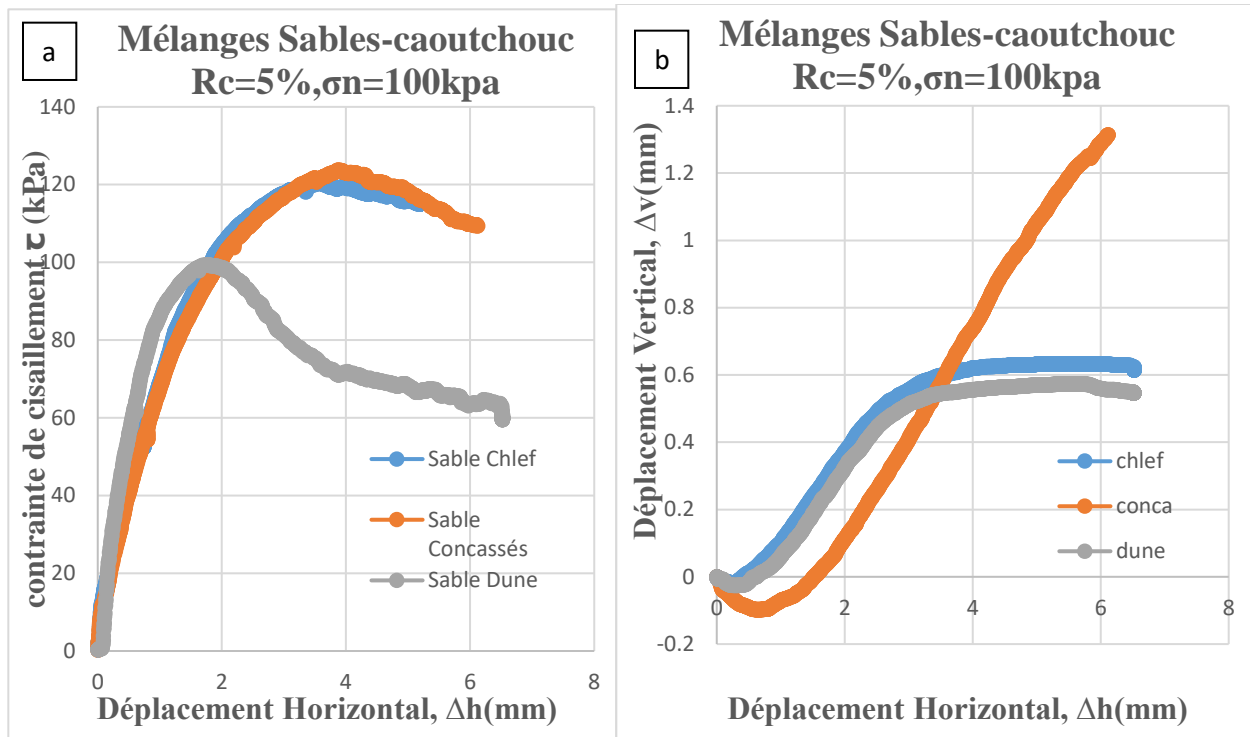
a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.1:** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=0\%$ ,  $\sigma_n=100$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



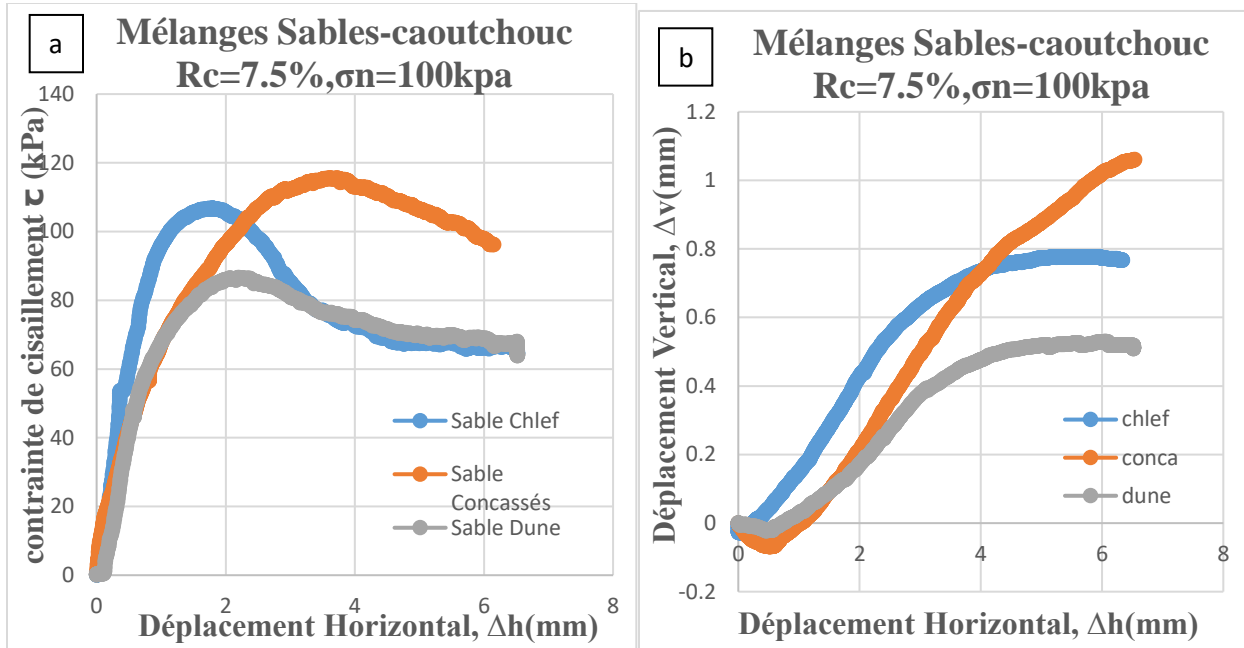
a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.2:** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=2.5\%$ ,  $\sigma_n=100$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



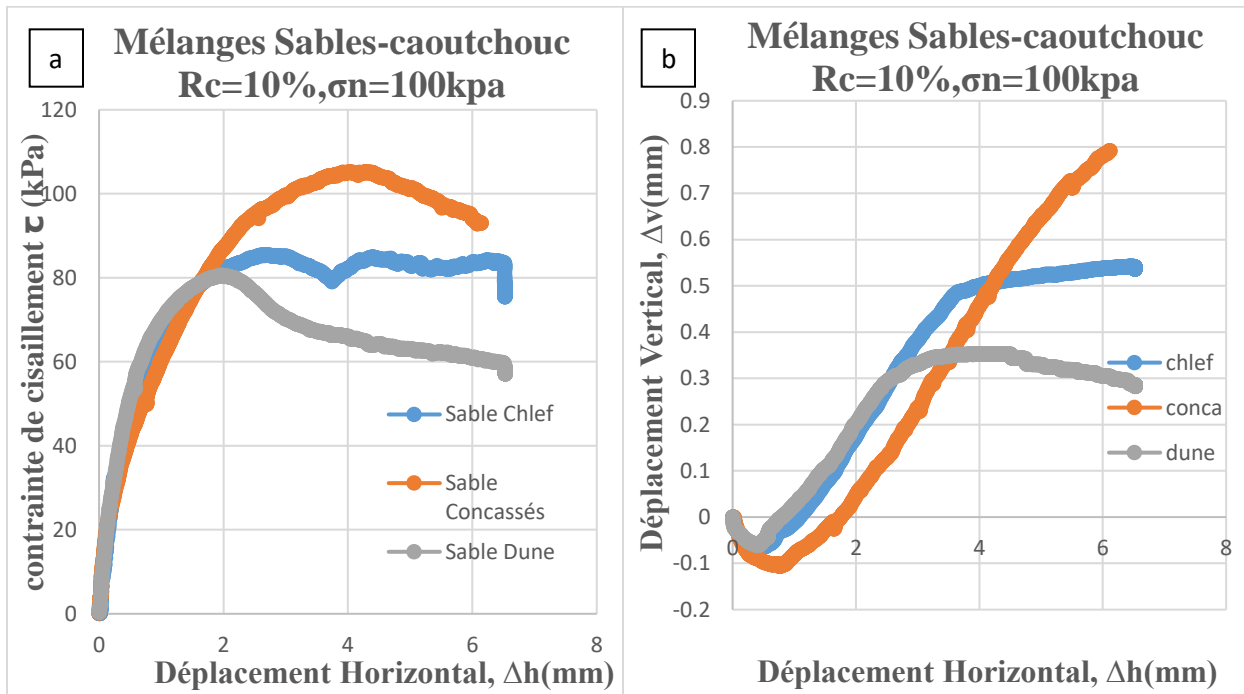
a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.3:** : Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=5\%$ ,  $\sigma_n=100$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.4:** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c = 7.5\%$ ,  $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$ ). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



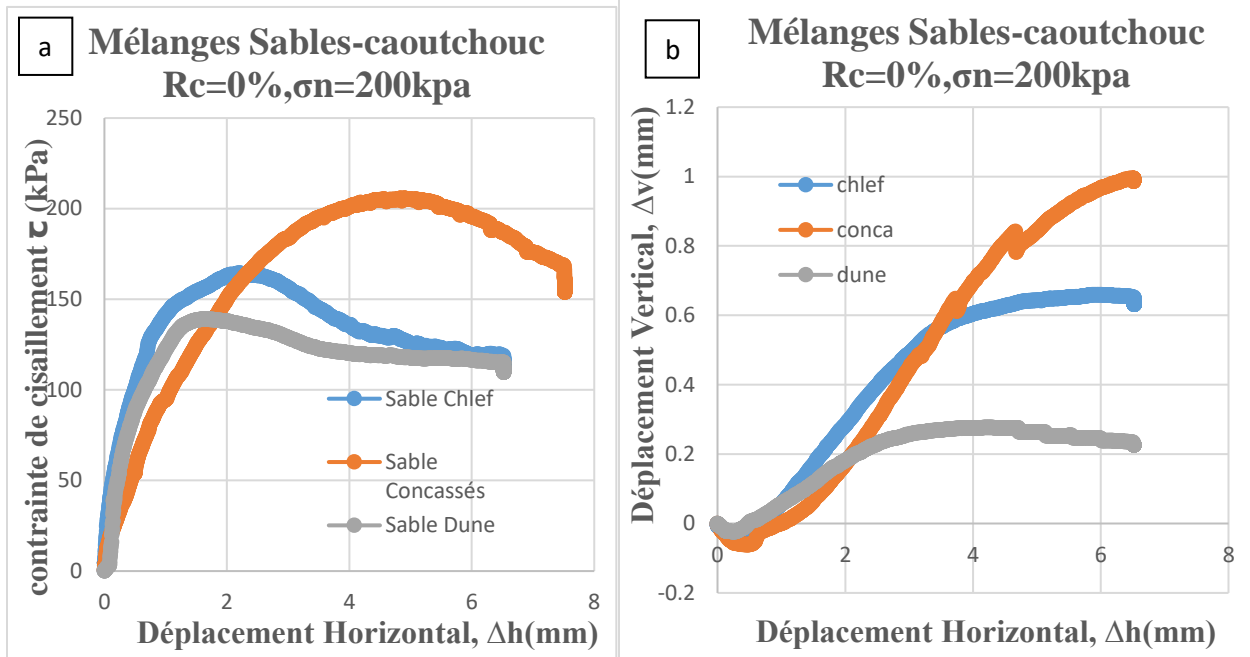
a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.5:** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=10\%$ ,  $\sigma_n=200$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical

#### **4.2.2 Contrainte normale initiale moyenne, $\sigma_n=200$ kPa**

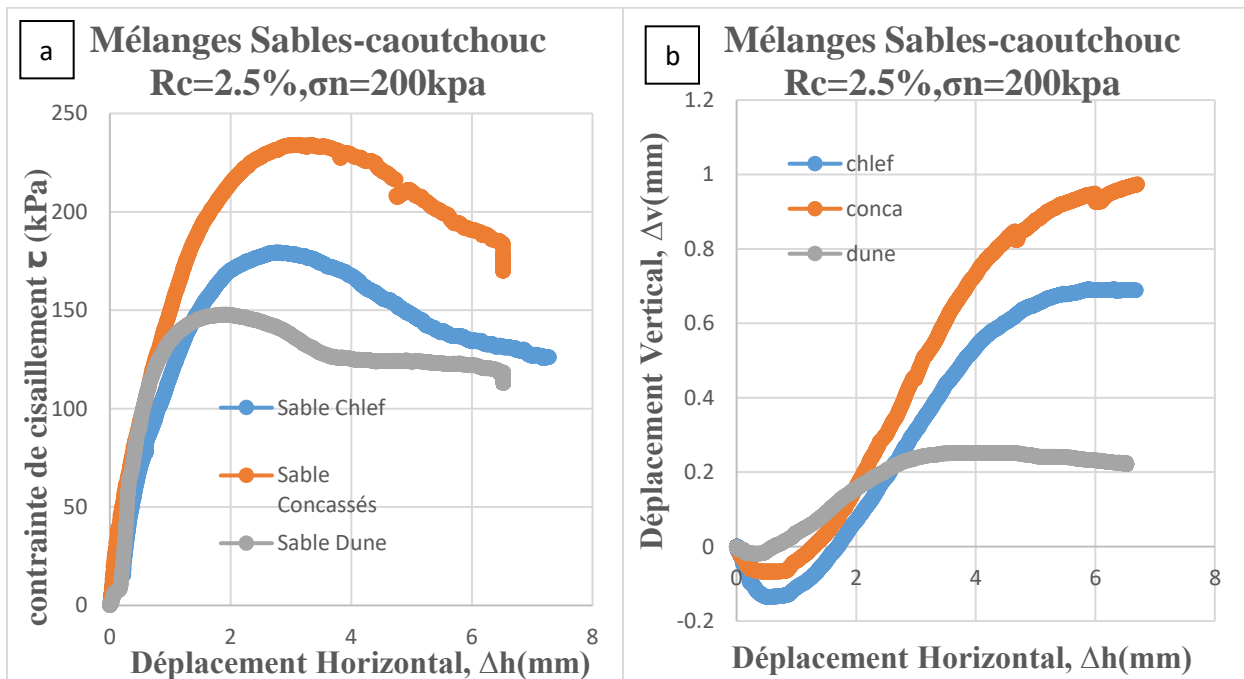
Pour l'objet de l'analyse l'effet de la forme des grains (sable de Chlef d'une forme semi-arrondie, sable de dune une forme sphérique et sable de concassé d'une forme anguleuse) sur la réponse mécanique des mélanges sable-granulés de caoutchouc considérant une gamme de granules de caoutchouc variée entre  $R_c=0\%$  et  $R_c=10\%$  avec un pas de 2.5%. Les Figures 4.6-4.10 reproduisent les résultats des essais obtenus à partir de la présente étude. Les échantillons ont été reconstitués avec la méthode de pluviation à sec pour une densité relative initiale dense ( $D_r=90\%$ ) et soumis à une contrainte normale moyenne ( $\sigma_n=200$  kPa). On remarque que la forme des grains a un effet très remarquable sur la résistance au cisaillement de différents mélanges sable-granulés de caoutchouc, comme illustré sur les figures 4.6a, 4.7a, 4.8a, 4.9a et 4.10a. De plus, les échantillons des mélanges sable concassé-granulés de caoutchouc, soumis à une contrainte normale initiale de 200 kPa, présentent des augmentations de (25% pour  $R_c=0\%$ , 31% pour  $R_c=2.5\%$ , 17% pour  $R_c=5\%$ , 13% pour  $R_c=7.5\%$  et 16% pour  $R_c=10\%$ ) et (48% pour  $R_c=0\%$ , 58% pour  $R_c=2.5\%$ , 50% pour  $R_c=5\%$ , 46% pour  $R_c=7.5\%$  et 36% pour  $R_c=10\%$ ) en termes de résistance au cisaillement par rapport aux échantillons des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc et des mélanges sable de dune-granulés de caoutchouc, respectivement.

Les figures 4.6b, 4.7b, 4.8b, 4.9b et 4.10b illustrent l'évolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal, en prenant en compte l'effet de la forme des grains des différents sables mélangés avec diverses teneurs en granules de caoutchouc. Les résultats obtenus confirment l'importance du paramètre de la forme des grains des sables. En effet, la forme anguleuse des grains du sable concassé montre une phase de dilatance beaucoup plus marquée par rapport aux autres formes, à savoir la forme semi-arrondie du sable de Chlef et la forme sphérique du sable de dune, et ce pour les cinq fractions de granules de caoutchouc étudiées.



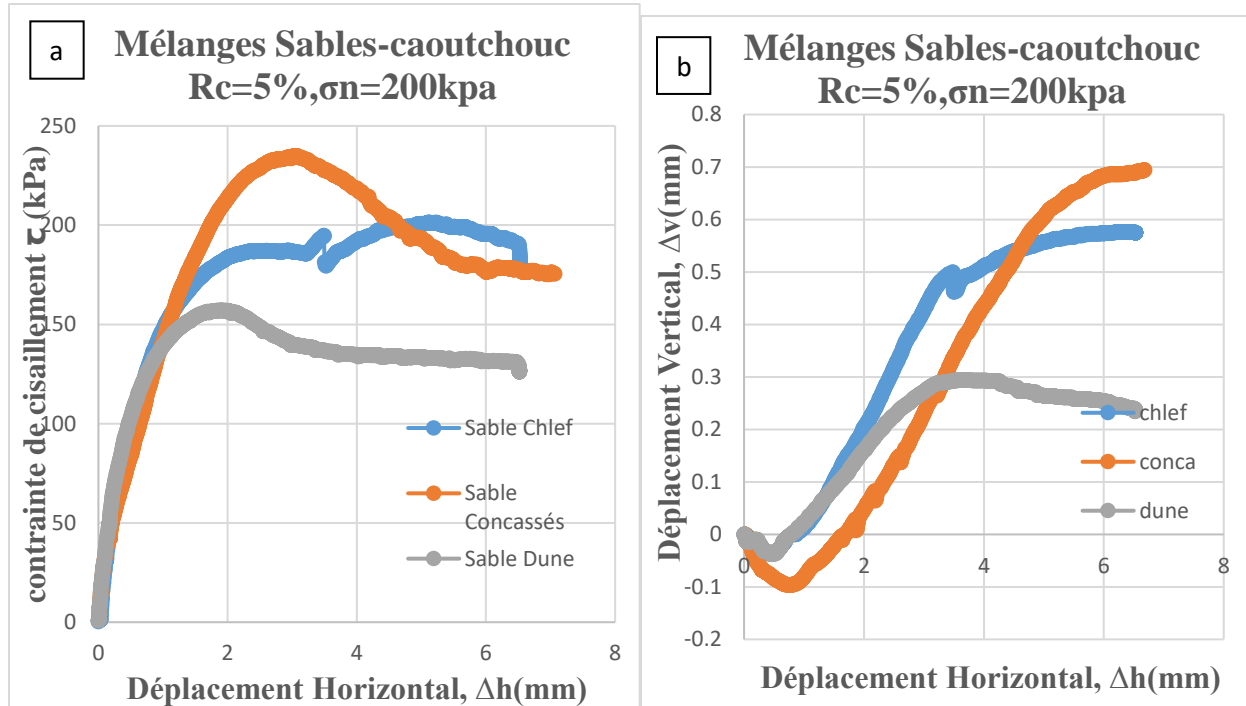
a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.6:** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=0\%$ ,  $\sigma_n=200\text{ kPa}$ ). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



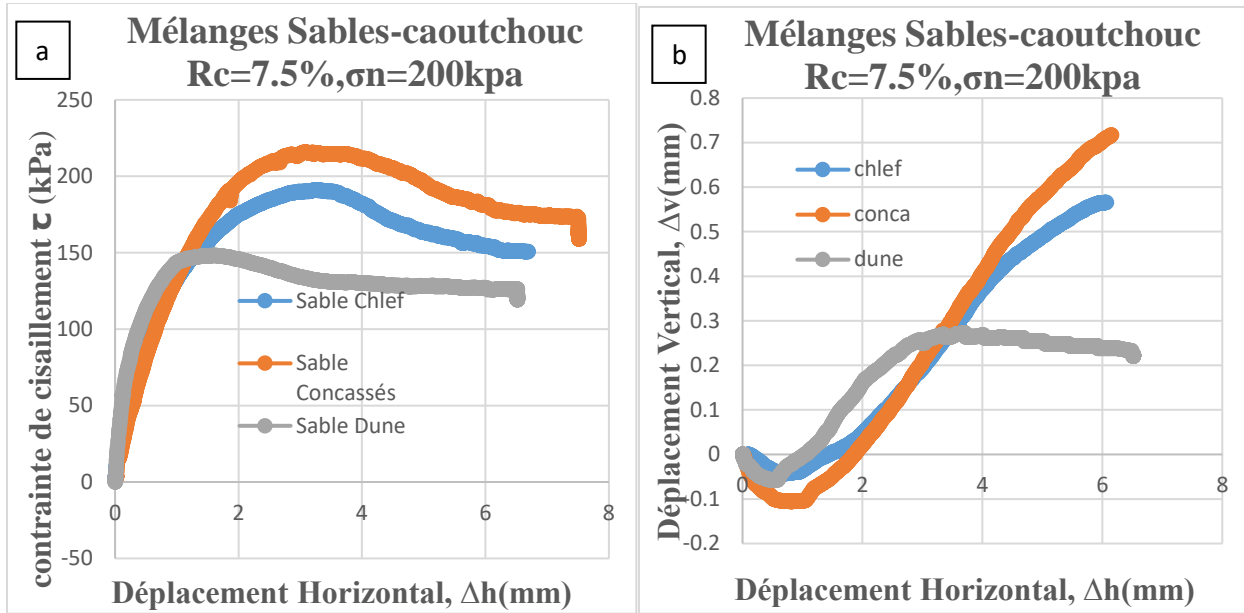
a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.7:** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=2.5\%$ ,  $\sigma_n=200$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



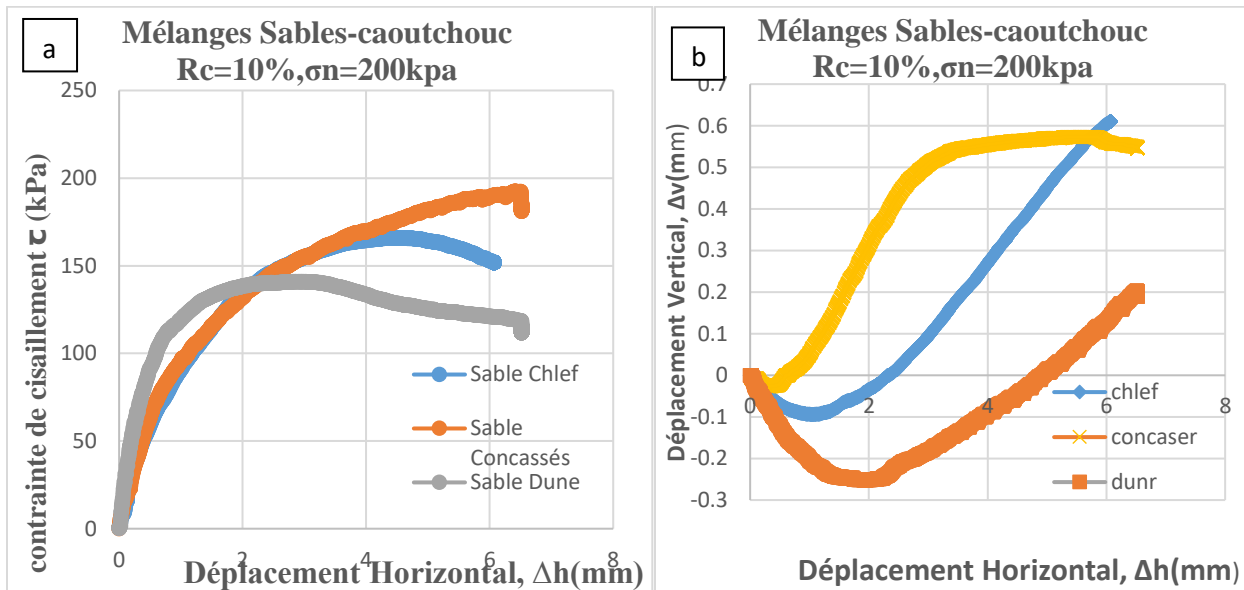
a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.8:** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=5\%$ ,  $\sigma_n=200$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.9:** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=7.5\%$ ,  $\sigma_n=200$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

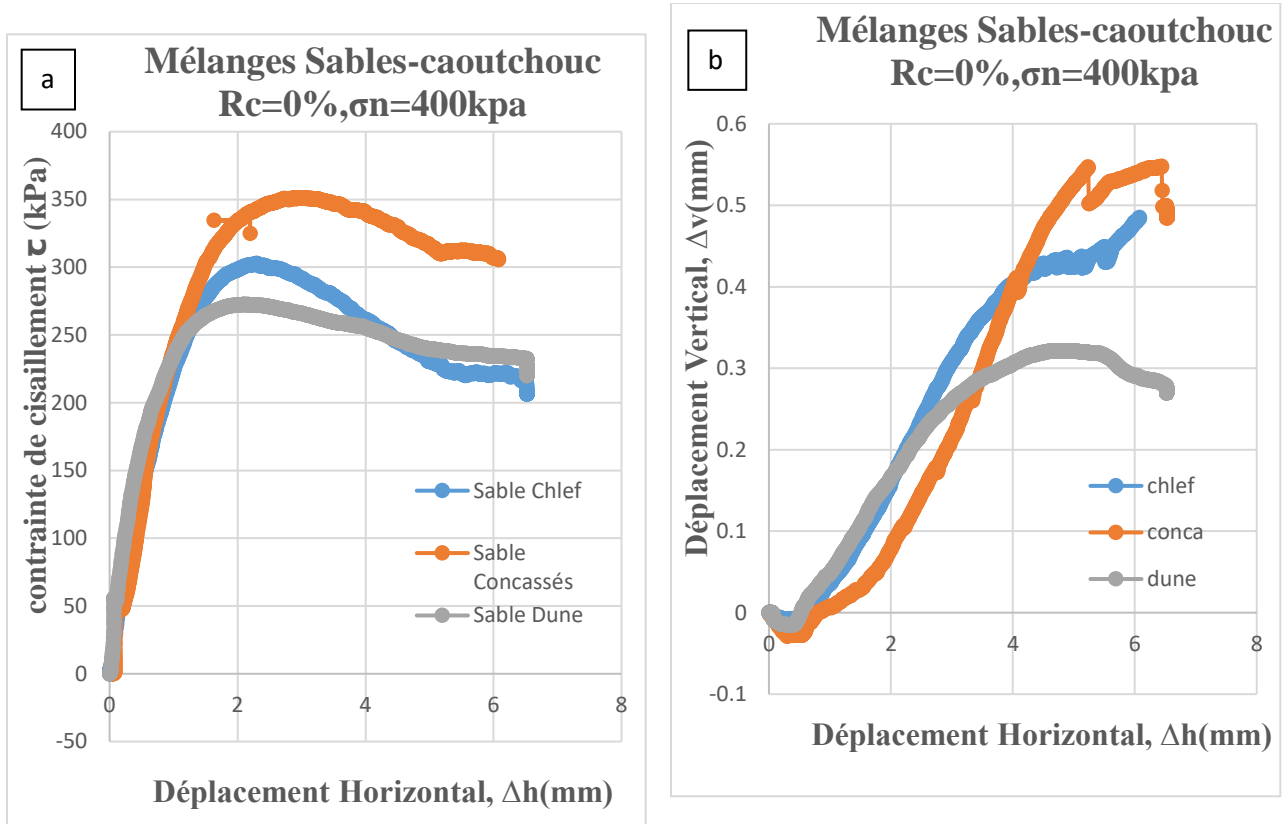
**Figure 4.10 :** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=10\%$ ,  $\sigma_n=200$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical

### **4.2.3 Contrainte normale initiale élevée, $\sigma_n=400$ kPa**

Les Figures 4.11-4.15 présentent les résultats de la réponse mécanique des échantillons de différents types de sables (sable concassé, sable de Chlef et sable de dune) en vue d'analyser l'impact de la forme des grains (anguleuse et semi-arrondie et sphérique) respectivement. Ces trois types de sables ont été mélangés avec des pourcentages de granules de caoutchouc variant de  $R_c=0\%$  à  $R_c=10\%$ , avec un pas d'augmentation de 2.5%. Les mélanges ont été préparés en utilisant la méthode de pluviation à sec et soumis à une contrainte normale initiale élevée ( $\sigma_n=400$  kPa) avec une densité relative initiale de 90%. Les figures 4.11a, 4.12a, 4.13a, 4.14a et 4.15a montrent une augmentation progressive de la résistance au cisaillement en fonction des formes des grains des trois types de sables (sable de dune d'une forme sphérique, sable Chlef d'une forme semi-arrondie et sable concassé d'une forme anguleuse) pour les différentes teneurs en granules de caoutchouc considérées ( $R_c=0, 2.5, 5, 7.5$  et  $10\%$ ).

Les résultats obtenus de la contrainte normale initiale élevée ( $\sigma_n=400$  kPa) indiquent que les mélanges de sable concassé-granules de caoutchouc atteignent des résistances au cisaillement plus élevées ( $\tau_{max} = 351.16$  kPa,  $377.02$  kPa,  $431.25$  kPa,  $364.3$  kPa et  $363.88$  kPa) en comparaison aux mélanges de sable de Chlef-granules de caoutchouc ( $\tau_{max} = 304.13$  kPa,  $324.25$  kPa,  $367.52$  kPa,  $344.05$  kPa et  $343.77$  kPa), cette différence de résistance au cisaillement devient très marquée entre les mélanges de sable concassé-granulés de caoutchouc et les mélanges de sable de dune-granulés de caoutchouc ( $\tau_{max} = 272.38$  kPa,  $289.25$  kPa,  $317.94$  kPa,  $305.41$  kPa et  $290.83$  kPa) pour les cinq fractions de granules de caoutchouc ( $R_c=0, 2.5, 5, 7.5$  et  $10\%$ ), respectivement.

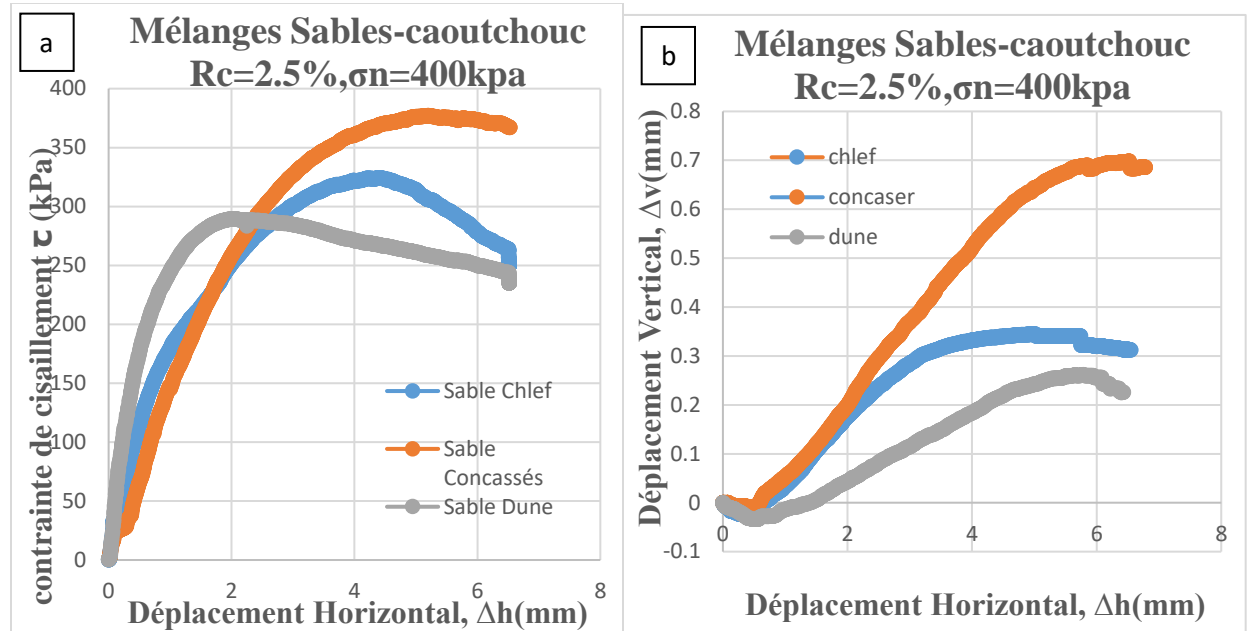
Les plans de déplacement vertical-horizontal présentés sur les Figures 4.11b, 4.12b, 4.13b, 4.14b et 4.15b mettent en évidence l'impact de la forme des grains sur le comportement dilatance-contractance des trois sables mélangés avec granules de caoutchouc. On remarque que la forme anguleuse des grains (sable concassé) se traduit par une diminution significative de la phase de contractance, ce qui améliore la phase de dilatance par rapport aux grains semi-arrondis (sable de Chlef) et arrondis (sable de dune) pour les différentes teneurs en granules de caoutchouc étudiées ( $R_c=0, 2.5, 5, 7.5$  et  $10\%$ ).



a) Evolution de la contrainte de cisaillement

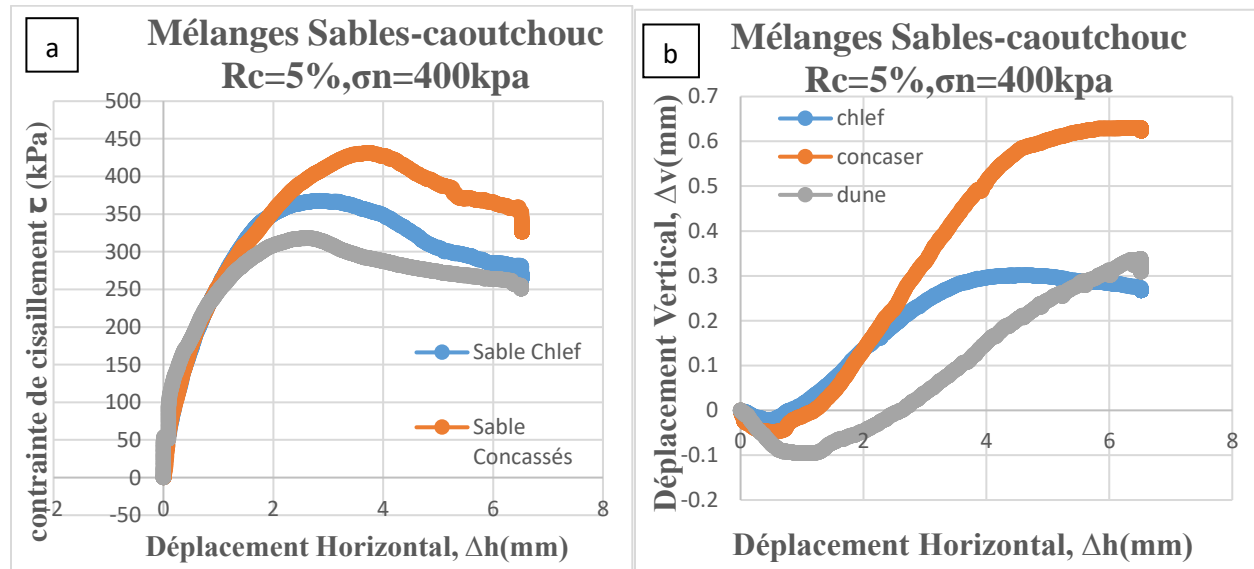
b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.11:** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=0\%$ ,  $\sigma_n=400\text{ kPa}$ ). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



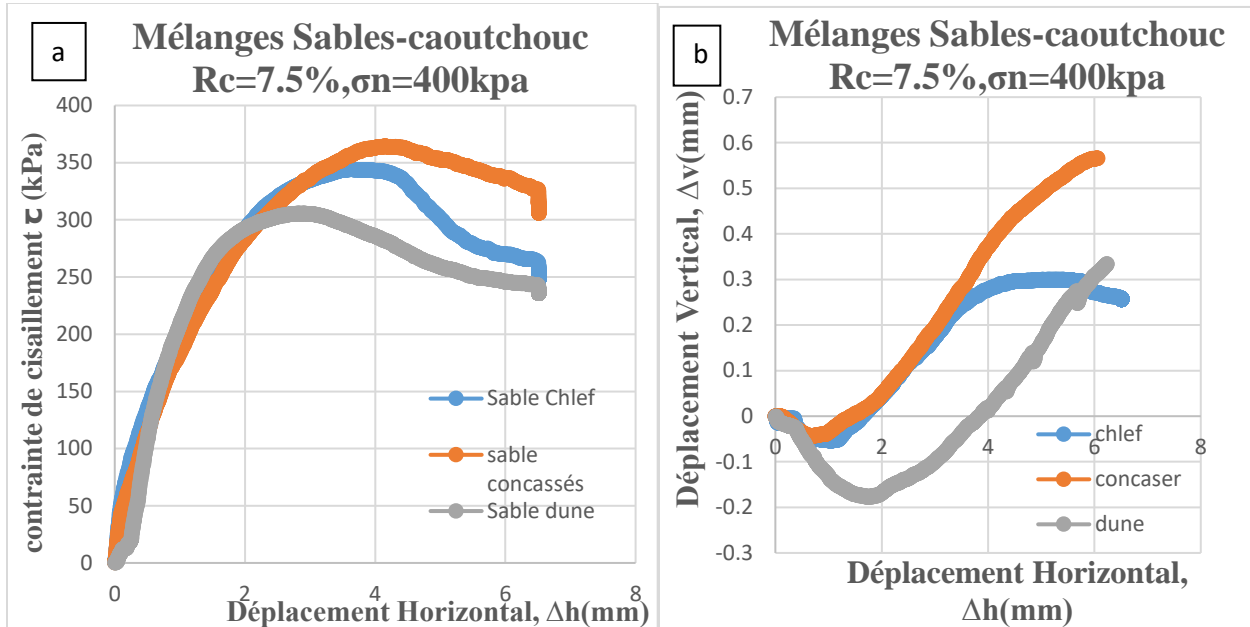
a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.12:** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=2.5\%$ ,  $\sigma_n=400\text{ kPa}$ ). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



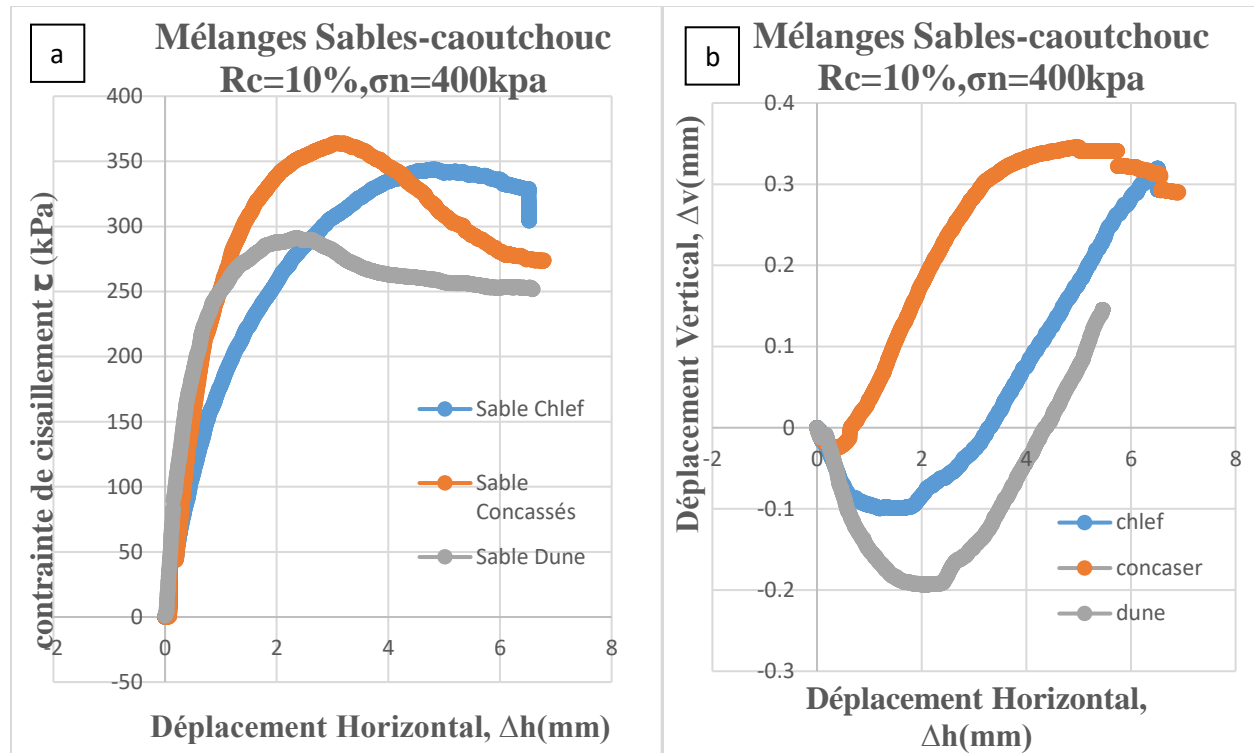
a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.13 :** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=5\%$ ,  $\sigma_n=400\text{ kPa}$ ). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

**Figure 4.14 :** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=7.5\%$ ,  $\sigma_n=400$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical



a) Evolution de la contrainte de cisaillement      b) Evolution de déplacement vertical

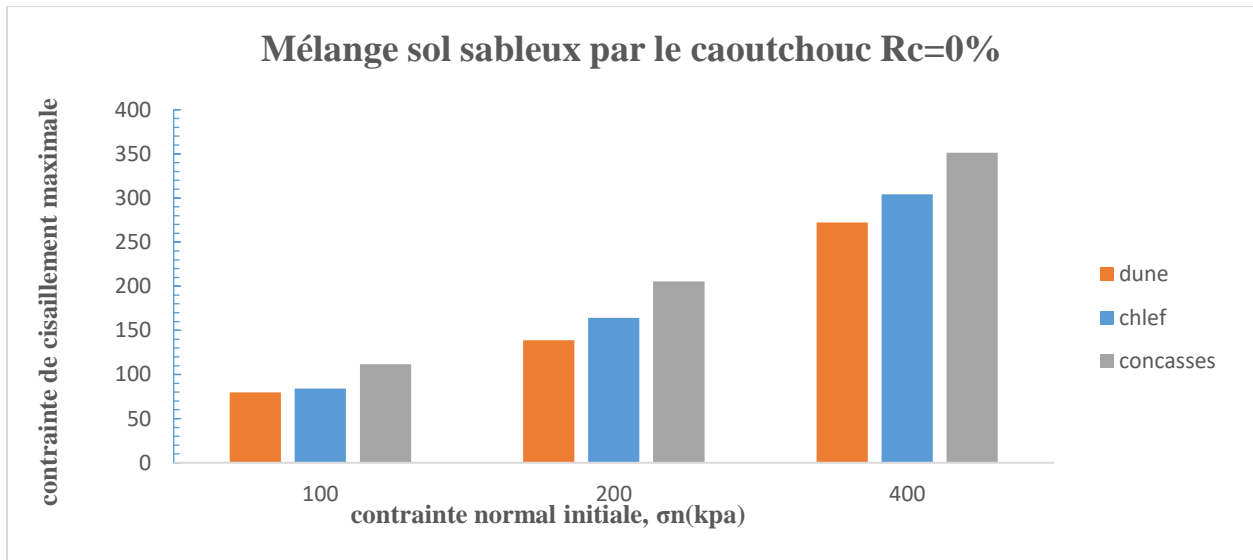
**Figure 4.15:** Effet de la forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ( $R_c=10\%$ ,  $\sigma_n=400$  kPa). a) Evolution de la contrainte de cisaillement, b) Evolution de déplacement vertical

### 4.3. Effet de la forme des grains sur la résistance au cisaillement maximale des mélanges sable-granulés de caoutchouc

Les résultats obtenus dans cette étude (Figures 4.1-4.15) sont résumés dans la Figure 3.16 afin d'analyser l'impact du paramètre de forme des grains (les trois types de sable mentionnés précédemment) sur la résistance au cisaillement maximale des mélanges sable-granulés de caoutchouc, en tenant compte des cinq fractions de granulés de caoutchouc ( $R_c=0, 2.5, 5, 7.5$  et  $10\%$ ) et des différentes contraintes normales initiales ( $\sigma_n= 100, 200$  et  $400$  kPa). Il est observé que la résistance au cisaillement maximale augmente progressivement en fonction de la forme des grains des trois types de sable (sable de dune arrondi, sable Chlef semi-arrondi et sable concassé anguleux) pour les sables purs ( $R_c=0\%$ ) ainsi que pour les mélanges sable-granulés de caoutchouc ( $R_c=2.5, 5, 7.5$  et  $10\%$ ) sous les trois contraintes normales initiales, où, les échantillons des mélanges sable concassé-granulés de caoutchouc présentent des résistances au

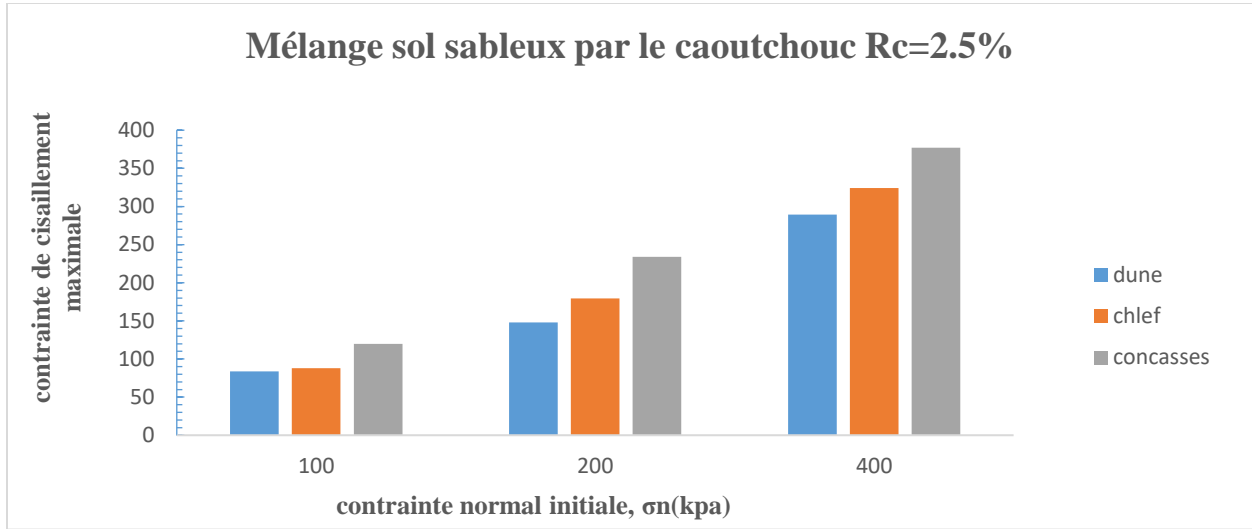
## Chapitre 4 : Effet de la forme des particules sur la caractérisation mécanique des mélanges sable-granules de caoutchouc

cisaillement maximales plus élevées que ceux des mélanges sable Chlef-granulés de caoutchouc, et surtout par rapport aux mélanges sable de dune-granulés de caoutchouc. Ce comportement est expliqué par l'intensification des forces intergranulaires (enchevêtrement) générées par les grains anguleux (sable concassé) et semi-arrondis (sable de Chlef) entre eux, entraînant une nette augmentation de la résistance au cisaillement maximale par rapport aux échantillons des mélanges composés de grains arrondis (sable de dune). Par ailleurs, les résultats obtenus révèlent également une augmentation significative de la résistance au cisaillement maximale en fonction de l'augmentation de la contrainte normale initiale pour les trois types de sables considérés, ainsi que pour leurs mélanges de caoutchouc.

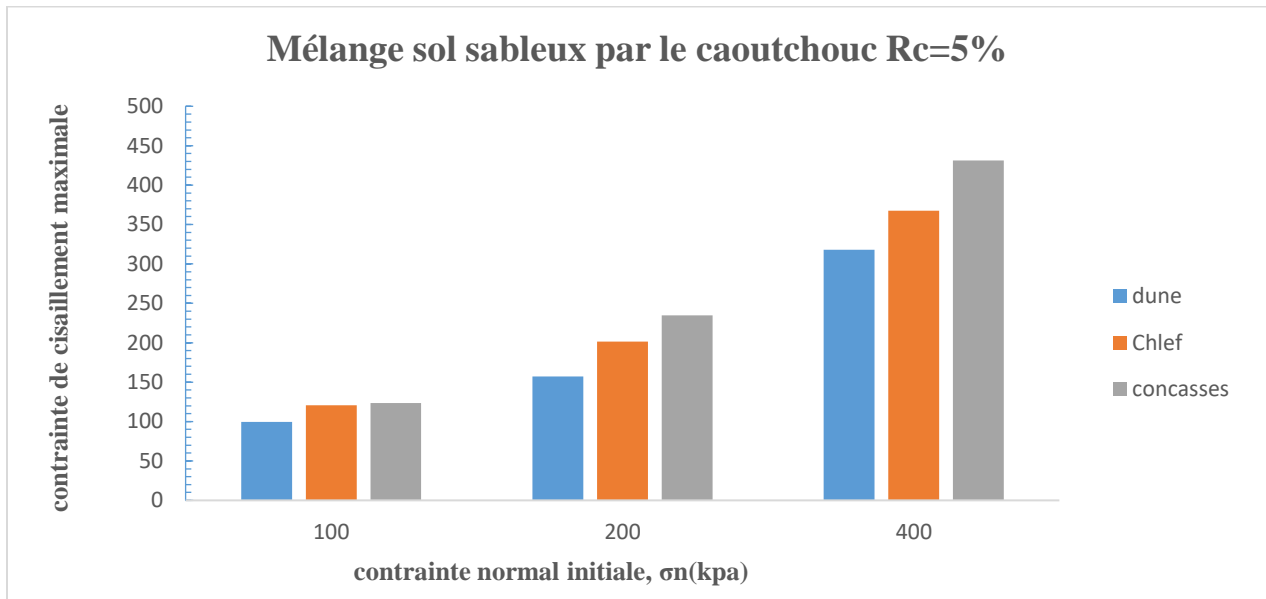


(a) – Rc=0%,

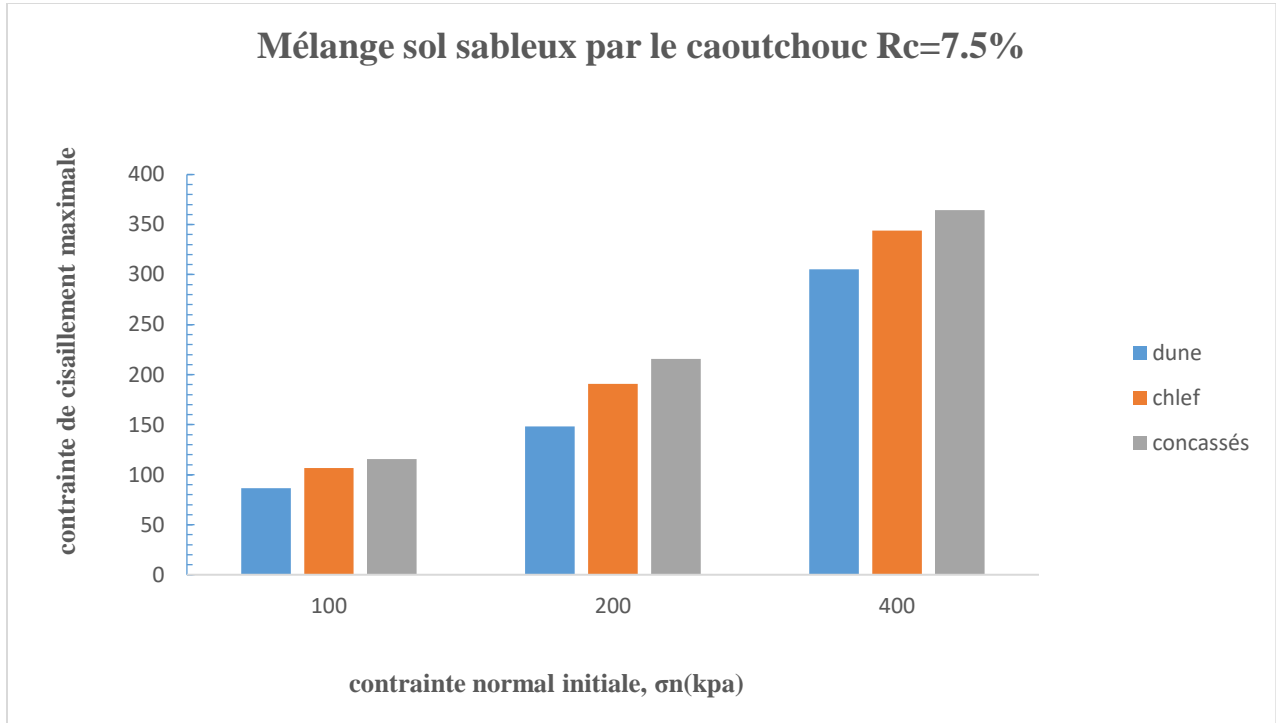
**Chapitre 4 : Effet de la forme des particules sur la caractérisation mécanique des mélanges sable-granules de caoutchouc**



(b) - Rc=2.5%,



(c) - Rc=5%,



(d) - Rc=7.5%,

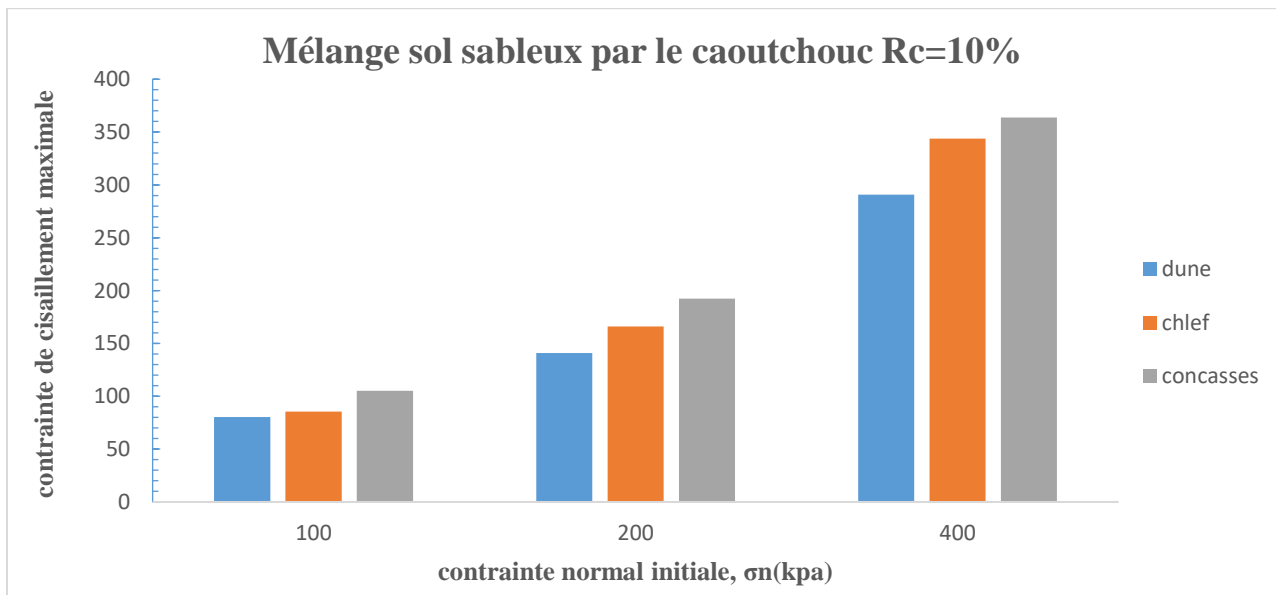


Figure 4.16: Effet de la forme des particules sur la résistance au cisaillement maximale

(e) Rc=10%

(a) – Rc=0%, (b) - Rc=2.5%, (c) - Rc=5%, (d) - Rc=7.5%, (e) - Rc=10%

**4.4. Effet de la forme des grains sur l'angle de frottement de différents mélanges**

## Chapitre 4 : Effet de la forme des particules sur la caractérisation mécanique des mélanges sable-granules de caoutchouc

L'effet de la forme des grains de trois types de sables sélectionnés (sable concassé, sable de Chlef et sable de dune) sur l'angle de frottement ( $\phi$ ) des échantillons de trois sables mélangés avec les cinq teneurs en granules de caoutchouc a été abordés dans cette section. Les données de la présente étude ont été reproduites dans la Figure 4.17. D'après cette figure, on constate que les résultats de l'angle de frottement considérant l'effet de la forme des grains confirment les résultats de la résistance au cisaillement qui ont été discutés dans les sections 4.2 et 4.3, où, l'angle de frottement généralement augmente successivement avec les trois types de sables ; sable de dune, sable de Chlef puis sable concassé pour les cinq fractions de granules de caoutchouc ( $R_c=0, 2.5, 5, 7.5$  et  $10\%$ ). À titre d'exemple, les échantillons des mélanges de sable concassé mélangé avec 5% de granules de caoutchouc montrent des augmentations de l'angle de frottement de 15% et 25% par rapport aux échantillons des mélanges de sable de Chlef-granules de caoutchouc et de sable de dune-granules de caoutchouc, respectivement. La tendance observée résulte du rôle de la forme des grains dans l'augmentation de l'enchevêtrement des particules pour la forme anguleuse (sable concassé) par rapport aux autres formes (semi-arrondie et sphérique) de sable de Chlef et de dune, respectivement.

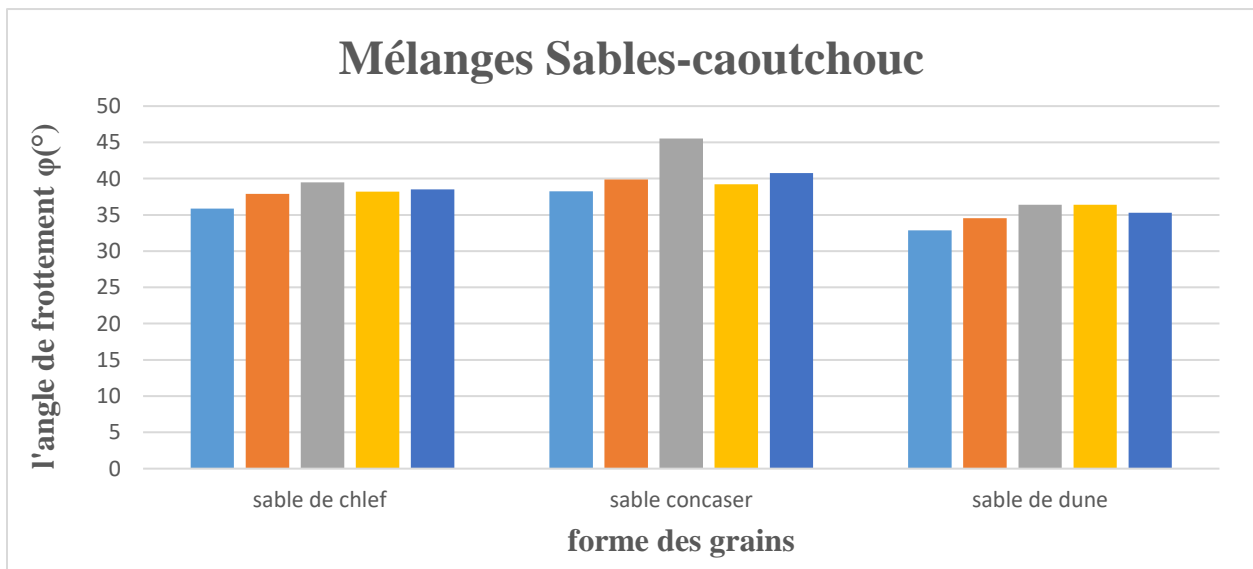


Figure 4.17: Effet de la forme des grains sur l'angle de frottement

## **4.5 Conclusion**

Ce chapitre a comporté une présentation des résultats d'une série des essais à la boîte de cisaillement visant à évaluer l'influence de la forme des grains des sable (sable de dune « forme sphérique », sable de Chlef « forme semi-arrondie » et sable concassé « forme semi-arrondie ») sur le comportement mécanique de ces trois sables mélangés par des proportions de granules de caoutchouc ( $R_c=0, 2.5, 5, 7.5$  et  $10\%$ ). Les échantillons de différents mélanges ont été reconstitués avec la méthode de préparation de pluviation à sec et soumis à trois contraintes normales initiales ( $\sigma_n= 100, 200$  et  $400$  kPa) à une densité relative initiale dense ( $D_r=90\%$ ).

Les résultats des essais de cisaillement direct obtenus montrent clairement que le paramètre de la forme des grains contrôle de manière significative la réponse de la résistance au cisaillement (en terme de résistance au cisaillement et l'angle frottement) des différents sables purs, ainsi que pour leurs mélanges de caoutchouc considérant tous les paramètres sélectionnés.

Les résultats obtenus indiquent que le sable concassé atteint une résistance au cisaillement élevée en comparaison avec le sable de Chlef et devient très prononcée par apport le sable de dune pour les sables purs ( $R_c=0\%$ ) ainsi que pour les mélanges sable-granulés de caoutchouc ( $R_c=2.5, 5, 7.5$  et  $10\%$ ) considérant la gamme de contraintes normales initiales à l'étude. Ce comportement est dû aux forces intergranulaire (enchevêtrement) produites par les grains anguleux (sable concassé) et semi-arrondie (sable de Chlef) entre eux et qui induisent une augmentation remarquable de la résistance au cisaillement par rapport aux échantillons ayant des grains sphériques (sable de dune).

En générale l'angle de frottement augmente successivement avec les mélanges sables-granule de caoutchouc ; mélanges sable de dune-granulés de caoutchouc, mélanges sable de Chlef granulés de caoutchouc puis mélanges sable concassé-granulés de caoutchouc.

# **CONCLUSION GENERALE**

### Conclusion générale

Ce travail de recherche expérimental avait pour objectif principal d'étudier en profondeur l'impact de la forme des grains sur (sable de dune « forme sphérique », sable de Chlef « forme semi-arrondie » et sable concassé « forme semi-arrondie ») sur le comportement mécanique de ces trois sables mélangés par des proportions de granules de caoutchouc ( $R_c=0, 2.5, 5, 7.5$  et  $10\%$ ). Les échantillons ont été préparés en laboratoire à une densité relative initiale élevée ( $D_r = 90\%$ ) et soumis à trois niveaux de contraintes normales initiales (100, 200 et 400 kPa). Cette étude a également permis d'analyser les effets la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique des mélanges de sables (Chlef, dune et concassé) incorporant les granulés de caoutchouc.

1. Les résultats des essais de cisaillement direct mettent en évidence que la forme des grains de sable contrôle de manière significative leur réponse en termes de résistance au cisaillement et d'angle de frottement des mélanges sable-granulés de caoutchouc. Il est observé que le sable concassé, de forme anguleuse, atteint une résistance au cisaillement nettement supérieure à celle du sable de Chlef semi-arrondi, elle-même beaucoup plus élevée que pour le sable de dune sphérique. Ce constat vaut aussi bien pour les sables purs que pour les mélanges sable-granulés à différents pourcentages de caoutchouc (2,5 à 10%), et quelle que soit la contrainte normale initiale appliquée. Ce comportement provient des forces de frottement intergranulaire accrues induites par l'enchevêtrement des grains anguleux et semi-arrondis entre eux, contrairement aux grains sphériques. Cet enchevêtrement accroît remarquablement la résistance au cisaillement.
2. Les résultats des essais sur différents mélanges révèlent que l'incorporation de granulés de caoutchouc a un impact significatif sur les propriétés mécaniques des sols sableux étudiés. Ces effets se traduisent principalement par une amélioration de la résistance maximale au cisaillement, de la résistance au cisaillement normalisée et de l'angle de frottement. Cela souligne le rôle crucial des granulés de caoutchouc pour renforcer et améliorer les caractéristiques mécaniques des sols sableux. Plus précisément, il a été observé que la résistance maximale au cisaillement augmente avec la teneur en granulés de caoutchouc jusqu'à un seuil optimal atteint pour une proportion de 5% de granulés. Au-delà de ce seuil de 5%, une tendance inverse a été constatée avec une dégradation des performances mécaniques pour tous les échantillons testés contenant plus de 5% de granulés de caoutchouc.

## **Conclusion général**

---

3. Voici quelques perspectives pour faire progresser cette étude, basées sur les résultats expérimentaux obtenus :

1. Étudier les effets des différentes méthodes de préparation des échantillons en reproduisant le même programme expérimental avec diverses techniques de préparation. Ceci permettrait d'évaluer dans quelle mesure les méthodes de préparation influencent les résultats obtenus.

Réaliser une étude approfondie sur l'impact de la teneur et la taille des granulés de caoutchouc incorporées dans les sables de Chlef, sable de dune et sable concassé, en effectuant des essais triaxiaux statiques et cycliques pour tous les paramètres considérés. Cette approche vise à mieux comprendre le comportement mécanique des mélanges sable-granulés de caoutchouc sous des conditions de chargement plus complexes.

## Références

- Aksoy, H. S., TAHER, N., & AWLLA, H. (2021).** Shear strength parameters of sand-tire chips mixtures. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 713-720.
- ALI -TALEB, M.-A., & ADDA, A. (2023).** Influence de la forme des particules sur la caractérisation mécanique du mélange sable-charbon biologique . Chlef : Université HASSIBA BEN BOUALI –CHLEF.
- Anvari, S. M., Shooshpasha, I., & Kutanaei, S. S. (2017).** Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 936-944.
- Cherif Taiba A, Mahmoudi Y, Belkhatir M, et Schanz T, (2018)** "Experimental Investigation into the Influence of Roundness and Sphericity on the Undrained Shear Response of Silty Sand Soils".
- Cherif Taiba, A. (2017)** “Etude en laboratoire de la susceptibilité à la liquéfaction de sable limoneux : Influence de la forme et taille des grains”, thèse de doctorat, Université de Chlef, Algérie.
- Dai, B. B., Liu, Q., Mao, X., Li, P. Y., & Liang, Z. Z. (2023).** A reinterpretation of the mechanical behavior of rubber-sand mixtures in direct shear testing. *Construction and Building Materials*, 363, 129771.
- Edinçliler, A., Cabalar, A. F., Cagatay, A. and Cevik, A. (2010).** Triaxial compression behavior of sand and tire wastes using neural networks. *Neural Computing and Applications*, 21(3), 441-452.
- <https://doi.org/10.1007/s00521-010-0430-4>
- Ghazavi, M., Ghaffari, J. and Farshadfar, A. (2011).** Experimental determination of waste tire chipsand-geogrid interface parameters using large direct shear tests. 5th Symposium on Advances in Science and Technology.
- Guo, P Su,X (2007)** "Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials" *Can. Geot. J* 44(5) 579-591
- Hafsa, T. (2019).** Effet de la méthode de reconstitution sur le comportement mécanique d'un mélange sable-cendre volante. Chlef : Université Hassiba BEN BOUALI –CHLEF.
- Holtz WG, Gibbs HJ (1956)** "Triaxial shear tests on previous gravelly soils".
- ISMAIL, B., & AZIZ SIDI, A. (2023).** Comportement en cisaillement d'un sable mélangé à des déchets de céramique et des fibres de polypropylène. Chlef: Université Hassiba BEN BOUALI –CHLEF.

**Marto, A., Latifi, N., Moradi, R., Oghabi, M. and Zolfeghari, S.Y. (2013).** Shear properties of sand-tire chips mixtures. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18 (2), 325-334.

**Rouhanifar, S., Afrazi, M., Fakhimi, A. and Yazdani, M. (2020).** Strength and deformation behaviour of sand-rubber mixture. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 1-15.

<https://doi.org/10.1080/19386362.2020.1812193>

**Safaa, M., & Meriem , E. (2019).** Etude expérimentale de la réponse mécanique d'un mélange sable-cendre volante : Influence de la taille des grains. Chlef: Université Hassiba BEN BOUALI –CHLEF.

**Santamarina, J. C., & Cho, G. C. (2001).** Determination of critical state parameters in sandy soils—simple procedure. *Geotechnical testing journal*, 24(2), 185-192.

**Sarra, Z., & Hassina, L. (2023).** Etude expérimentale de l'influence de la teneur en poudre de verre sur la résistance au cisaillement des sols granulaires. Chlef: Université Hassiba BEN BOUALI –CHLEF .

**Sung, B. H., Wong, S. Y., Cyril, P. A., Lee, M. L., & Mohamed, A. A. (2022).** Effects of Crumb Rubber on the Shear Strength of Sand: An Experimental Study. *Advances in technology*, 167-182.

**Tiwari, S.K., Sharma, J.P. and Yadav, J.S. (2017).** Geotechnical properties of dune sand-waste tires. *Composite Materials Today: Proceedings*, 4(9), 9851-9855.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.280>

**Tsomokos A. &Georgiannou V.N. (2009)** "Effect of grain shape and angularity on the undrained response of fine sands". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, Number 5.pg

**Xiao, Leihang Long; T. Matthew Evans, Hai Zhou; Hanlong Liu, and Armin W. Stuedlein, (2019)** "Effect of Particle Shape on Stress-Dilatancy Responses of Medium-Dense Sands". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 145(2) : 04018105.

[https://www.researchgate.net/publication/330800380\\_Effect\\_of\\_Particle\\_Shape\\_on\\_Stress-Dilatancy\\_Responses\\_of\\_Medium-Dense\\_Sands](https://www.researchgate.net/publication/330800380_Effect_of_Particle_Shape_on_Stress-Dilatancy_Responses_of_Medium-Dense_Sands)

**Yang, J., and Wei, L.M. (2012).** "Collapse of loose sand with the addition of fines: The role of particle shape". *Geotechnique*, 62(12): 1111–1125.

doi:10.1680/geot.11.P.062.

**Yang, J., Luo,X.D (2015)**"Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials". *J. Mech. Phys. Solids* 84, 196–213.