

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
Université Hassiba Benbouali –Chlef
كلية 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 caractérisation mécanique du sol
sableux (concassé et dune) : Effet de la teneur en fibres de doum.*

Présenté par :
LABANI Charifa

Dirigé par:
Dr. Cherif Taiba Abdellah

Promotion : 2023/2024

Remerciements

Toute notre gratitude, grâce et remerciement vont à Allah le tout puissant qui nous a procuré la santé, le temps, la volonté et le courage pour terminer ce travail.

*Je voudrais dans un premier temps, c'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercie mon encadreur de mémoire : **Dr. Cherif Taiba Abdellah** pour leur patience, leur conseils, leur assistance scientifique et leur aide dans la collecte des matériaux et la réalisation des essais au niveau du laboratoire.*

*Je remercie aussi **Dr. Mahmoudi Youcef, Pr. Belkhatir Mostafa** et le doctorant **Megrouse Mohamed** pour son soutien du début de ce mémoire jusqu'à sa fin.*

*Sans oublier, nous adressons nos remerciements à **Mr. ZIDANE Boumediene**, ingénieur du Laboratoire de Mécanique des sols de l'Université Hassiba Ben Bouali-CHLEF, pour nous avoir donné de son temps lors de la préparation de ces notes de service.*

Je remercie les membres de jury qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Enfin, je remercie chaleureusement toutes les personnes qui ont veillés sur notre formation et toutes celles qui ont participé de près ou de loin par leur aides et soutient à élaborer ce projet dans les meilleures conditions.

Merci

Dédicace

*C'est grâce à Allah seul que j'ai pu achever ce travail, Je le dédie
à :*

*A ceux qui éclairent ma vie, mes chers parents, ma Mère ZIANE
BERROUJA Yamina mon Père LABANI Kadour pour tous
leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs
prières tout au long de mes études.*

A mes chères sœurs : Fatima Zahra et Jouhaina.

*Mes frères qui sont mes époles : Mostafa, Mohamed, Bilal,
Ismail et Solaimane, que Dieu ait pitié de lui.*

*Mes nièces qui j'aime beaucoup : Riad, Youcef, Lojaine, Baraa,
Ayoub, Israa, Adam, Rahma et Mostafa.*

*Mes amies: Hassiba, Narimane, Charifa, Kawther, Khawla,
Saliha et Yousra .*

*A mes collègue d'option géotechnique : REZALI Merwan, Med
Fadel Bohey, Dah Abdellah et Ghozli Riadh.*

*A mon ami qui vraiment m'encourageait : HANTTAOUI
Abdellah.*

*Tous les étudiants de la deuxième année master génie civil,
option géotechnique, promotion 2023/2024.*

Et enfin ceux qui sont présents dans mon cœur

Merci

SOMMAIRE

Résume en Arabe	I
Abstract	II
Résumé	III
Liste de Symbole	IV
Introduction générale	1

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction	5
1.2. Généralités sur les fibres et leurs impacts sur la réponse mécanique des sols	5
1.3. Effet des quelques facteurs sur la réponse mécanique des sols.....	12
1.3-1 Effet du rapport de surconsolidation	12
1.3.2 Effet de la teneur en fines.....	14
1.3.3 Effet de la conductivité hydraulique	16
1.3.4 Effet de la mode de dépôt.....	17
1.4. Conclusion.....	19

CHAPITRE II

DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET PROCEDURE DE L'ESSAI

2.1. Introduction.....	21
2.2. Dispositif expérimental.....	21

2.2.1. Introduction.....	21
2.2.2. But de l'essai.....	21
2.2.3 Eléments constituant la boîte de cisaillement	22
2.2.4. Description de l'essai.....	22
2.2.5. Détermination des caractéristiques intrinsèques de sols.....	23
2.3. Matériaux testés.....	24
2.4. Procédure de l'essai.....	26
2.4.1. Introduction	26
2.4.2. Reconstitution de l'échantillon.....	26
2.4.3. Mise en place de l'échantillon dans la boîte	27
2.4.4. Mise en place de la boîte sur la machine.....	27
2.4.5. Lectures	28
2.5. Conclusion.....	28

CHAPITRE III

INFLUENCE DE LA TENEUR EN FIBRE DE DOUM SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES SOLS SABLEUX

3.1 Introduction.....	30
3.2. Résultats des essais réalisés	31
3.2.1. Mélange sable de dune-fibres de doum	31
3.2.2. Mélange sable concassé-fibres	32
3.3. Influence de la teneur de fibres de doum sur la résistance au cisaillement maximale	34
3.4. Influence de la teneur en fibres de doum sur la résistance au cisaillement normalisée.....	36
3.5. Influence de la teneur en fibres de doum sur l'angle de frottement	38
3.6. Mélange sable de dune-fibres de doum traité	39

3.7. Conclusion	41
-----------------------	----

CHAPITRE IV

EFFET DE DIVERS PARAMETRES SUR LA REPENSE MECANIQUE DES MELANGES SOL SABLEUX (SABLE DE DUNE ET SABLE CONCASSE)-FIBRES DE DOUM

4.1 Introduction.....	43
4.2. Résultats des essais réalisés	44
4.2.1 Influence de la contrainte normale initiale sur la réponse mécanique des mélanges de sols sableux-fibre de doum	44
4.2.1.1-Mélange sable de dune-fibres de doum.....	44
4.2.1.2 Mélange sable concassé-fibres de doum.....	46
4.2.2. Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique des mélanges sols sableux (dune et concassé) - fibres de doum	47
4.2.2.1 Contrainte normale initiale faible, $\sigma_n=100$ kPa.....	47
4.2.2.2 Contrainte normale initiale moyenne, $\sigma_n=200$ kPa	50
4.2.2.3 Contrainte normale initiale élevée, $\sigma_n=400$ kPa.....	53
4.2.3. Influence de la forme des particules et de la contrainte normale initiale sur la résistance au cisaillement maximale.....	56
4.3. Influence de la forme des particules sur l'angle de frottement.....	58
4.4. Conclusion	59
Conclusion générale.....	62
Références bibliographiques.....	64

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 02

Tableau 2.1 : Propriétés physiques du sable dune et concassé26

Tableau 2.2: Les masses calculées pour les échantillons testés.....27

CHAPITRE 03

Tableau 3.1 : Coefficient A, B, C et R^2 pour l'équation (3.1) 35

Tableau 3.2 : Coefficients A, B, C et R^2 pour équation (3.2)38

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 01

Figure 1.1: Réponse mécanique du sable renforcé par des fibres de noix de coco (a) 100 kPa. (b) 150 kPa Babu et al. (2007)..... 6

Figure 1.2 : Réponse mécanique d'argile renforcé par des fibres de verres. Sujatha et al. (2020).....7

Figure 1.3 : Comportement mécanique drainé pour le sable renforcé par trois différents types des fibres. Malidarreh et al. (2017) 8

Figure 1.4 : Réponse mécanique d'un mélange sable de Chlef-fibres (a) Fibres de verre (B) Fibres de polypropylène (c) Fibres de sisal. Missoum et al. (2021).....9

Figure 1.5: Comportement mécanique des mélanges sable de dune –fibres (a)- $D_r=50\%$, (b)- $D_r=92\%$.Nahar et Messaadia (2022) 10

Figure 1.6 : Comportement mécanique des mélanges sable de Chlef- fibres de doum ($\sigma_n=100$ kPa ; $D_r = 90\%$) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical Elakeb et Elhabchi (2023). 11

Figure 1.7 : Comportement mécanique des mélanges sable de CHLEF- fibres ($\sigma_n=100$ kPa ; $D_r = 50\%$) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical Elakeb et Elhabchi (2023). 12

Figure 1.8 : Influence de rapport de surconsolidation sur le comportement monotone du sable de Chlef (Della et al 2011) 13

Figure 1.9 : Influence de rapport de surconsolidation sur le comportement cyclique du sable

d'oued Rass (Arab et Belkhatir et al. (2012)	14
Figure 1.10 : Effet de fines sur la résistance au cisaillement non drainée du sol ((a)-Trancoso1990) ((b) Koester1994)	15
Figure 1.11: (a) variation des propriétés mécanique avec la teneur en fines cohésion versus teneur en fines, (b) angle de frottement en fonction de teneur en fines (Flitti et al 2016).	16
Figure 1.12: L'effet de la conductivité hydraulique sur la résistance au cisaillement non drainée (Belkhatir et all 2012)	17
Figure 1.13 : Influence du mode de préparation sur la résistance au cisaillement non drainée (Mulilis et al 1977).	18
Figure 1.14 : Effet 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).....	19
CHAPITRE 02	
Figure 2.1 : Appareil de cisaillement utilisé dans cette étude.....	21
Figure 2.2: Composants de la boîte de cisaillement direct	22
Figure 2.3: Principe de l'essai de cisaillement direct	23
Figure 2.4 : La courbe intrinsèque des sols.	24
Figure 2.5 : Les matériaux utilisées dans cette étude expérimentale.....	25
Figure 2.6: Courbes granulométriques des matériaux utilisés (sable concassé et sable dune). .	25
CHAPITRE 03	
Figure 3.1 : Comportement mécanique des mélanges sable de dune-fibres de doum ;(Dr = 90%) (a)- $\sigma_n=100\text{kPa}$, (b)- $\sigma_n= 200\text{kPa}$ et $\sigma_n =400 \text{ kPa}$	32
Figure 3.2 : Comportement mécanique des mélanges sable de dune-fibres de doum ;(Dr = 90%) (a)- $\sigma_n=100\text{kPa}$, (b)- $\sigma_n= 200\text{kPa}$ et $\sigma_n =400 \text{ kPa}$	34
Figure 3.3 : Résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte normale initiale (a)-Mélange sable dune-fibres (b)-Mélange sable concassé-fibres	36
Figure 3.4 : Effet de la teneur en fibres de doum et la contrainte normale sur la résistance au cisaillement maximale (a)-Mélange sable dune-fibres de doum (b)-Mélange sable concassé-fibres de doum	36

Figure 3.5 : Impact de la teneur en fibres de doum sur résistance au cisaillement normalisée (τ/σ_n) des mélanges étudiés	37
Figure 3.6 : Angle de frottement en fonction de teneur en fibres de doum pour les matériaux étudiés	39
Figure 3.7 : Comportement mécanique des mélanges sable (dune et concassé) -fibres de doum traités	40
Figure 3.8 : Résistance au cisaillement maximale en fonction de teneur en fibres de doum traités des mélanges étudiés	40

CHAPITRE 04

Figure 4.1 : Effet de la contrainte normale sur le comportement mécanique du mélange sable dune-fibres (a)-DFC=0% , (b)-DFC=0.2% , (c)-DFC=0.4% ,(d)-DFC=0.6% , (e)-DFC=0.8%	45
Figure 4.2 : Effet de la contrainte normale sur comportement mécanique des mélange sable concassé- fibres(a)-DFc=0% , (b)-DFc=0.2% , (c)-DFc=0.4% ,(d)-DFc=0.6% , (e)-DFc=0.8%	47
Figure 4.3 : Effet la forme des particules sur le comportement mécanique. ($\sigma_n=100$ kPa, DFC=0%) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	48
Figure 4.4: Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=100$ kPa, DFC=0.2%) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement.(b)-Evolution de déplacement vertical	49
Figure 4. 5: Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=100$ kPa, DFC=0.4%) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	49
Figure 4. 6: Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=100$ kPa, DFC=0.6%) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	49
Figure 4. 7: Effet la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=100$ kPa, DFC=0.8%) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	50

Figure 4. 8 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=200$ kPa, $DF_c=0\%$) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	51
Figure 4. 9 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=200$ kPa, $DF_c=0.2\%$) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	51
Figure 4. 10 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=200$ kPa, $DF_c=0.4\%$) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	52
Figure 4. 11: Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=200$ kPa, $DF_c=0.6\%$) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	52
Figure 4. 12 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=200$ kPa, $DF_c=0.8\%$) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	53
Figure 4. 13 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=400$ kPa, $DF_c=0\%$) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	54
Figure 4. 14 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=400$ kPa, $DF_c=0.2\%$) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	54
Figure 4. 15 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=400$ kPa, $DF_c=0.4\%$) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	55
Figure 4. 16 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=400$ kPa, $DF_c=0.6\%$) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	55
Figure 4. 17: Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=400$ kPa, $DF_c=0.8\%$) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical	56

Figure 4. 18 : Résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte initiale des mélanges sol sableux (dune et concassé) –fibres de doum (a)-DFc=0%, (b)-DFc=0,2%, (c)-DFc=0,4%, (d)-DFc=0,6%, (e)-DFc=0,8%	57
Figure 4. 19 : Effet de la forme des particules sur l'angle de frottement des mélanges étudiés	59

ABSTRACT

The existing literature shows a very limited use of doum fibers in the geotechnical field to evaluate their effects on the mechanical properties of granular soils. Moreover, there is an increased need for research and investigation to understand how the addition of doum fibers affects the mechanical response of soils, by identifying and elucidating the underlying mechanisms that influence the behavior of these materials. In this context, the objective of this study is to develop a fundamental understanding of the mechanical behavior of two distinct types of sand (crushed and dune) reinforced with different proportions of doum fibers, ranging from $DF_c=0\%$ to $DF_c=0.8\%$. This study uses the Casagrande shear box device and aims to determine the possibility of incorporating these materials in the construction of subgrade layers and embankments for highways, earth dams, while developing design strategies aimed at reducing damages caused by failures, deformations, and excessive settlements of soil layers that support various public works engineering projects. The obtained test results highlight the significant impact of integrating doum fibers on the mechanical behavior of sandy soils. It is found that the maximum shear strength increases proportionally with the amount of doum fibers, reaching a threshold of $DF_c=0.4\%$ for dune sand and $DF_c=0.6\%$ for crushed sand. However, beyond these thresholds, an opposite trend is observed for all samples. Additionally, a correlation can be established between the friction angle and the content of doum fibers using a polynomial relationship considering all tested parameters. Finally, mixtures of crushed sand and doum fibers exhibit higher shear strength than that of dune sand-doum fibers mixtures.

KEYWORDS: Mechanical characteristics, doum fibers, dune sand, crushed sand, Casagrande shear box.

RESUME

La littérature existante montre une utilisation très restreinte des fibres de doum dans le domaine géotechnique pour évaluer leur effet sur les propriétés mécaniques des sols granulaires. De plus, il y a un besoin accru de recherche et d'investigation pour comprendre comment l'ajout de fibres de doum affecte la réponse mécanique des sols, en identifiant et en élucidant les mécanismes sous-jacents qui influencent le comportement de ces matériaux. Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est de développer une compréhension fondamentale du comportement mécanique des échantillons de deux types de sable distincts (concassé et dune) renforcés avec différentes proportions de fibres de doum, allant de $DF_c=0\%$ à $DF_c=0.8\%$. Cette étude utilise la boîte de cisaillement de Casagrande et vise à déterminer la possibilité d'incorporer ces matériaux dans la construction de couches de forme et de remblais pour les autoroutes, les barrages en terre, tout en élaborant des stratégies de conception visant à réduire les dommages causés par les ruptures, déformations et tassements excessifs des couches de sol qui servent de support aux divers projets de Travaux publics. Les résultats des essais menés sur différents mélanges mettent en lumière l'impact significatif de l'intégration de fibres de doum sur le comportement mécanique des sols sableux. De plus, il est remarqué que la résistance maximale au cisaillement augmente proportionnellement à la quantité de fibres de doum, atteignant sa valeur maximale à $0,4\%$ pour le sable de dune et de $DF_c=0,6\%$ pour le sable concassé. Cependant, au-delà de ces teneurs, la tendance opposée a été constatée pour tous les échantillons. En outre, une corrélation peut être établie entre l'angle de frottement et le contenu en fibres de doum en utilisant une relation polynomiale qui tient compte de tous les paramètres testés. Enfin, les mélanges contenant du sable concassé et des fibres de doum présentent une résistance au cisaillement supérieure à celle des mélanges de sable de dune et des fibres de doum.

MOTS CLES : caractérisation mécanique, fibres de doum, sable concassé, sable de dune, boîte de Casagrande.

ملخص

تُظهر الأدبيات الموجودة استخدامًا محدودًا للغاية لألياف الدوم في المجال الحيوتقني لتقييم تأثيرها على الخواص الميكانيكية للتربة الحبيبية. بالإضافة إلى ذلك، هناك حاجة متزايدة للبحث والتحقيق لفهم كيفية تأثير إضافة ألياف الدوم على الاستجابة الميكانيكية للتربة، وتحديد وتوضيح الآليات الأساسية التي تؤثر على سلوك هذه المواد. وفي هذا السياق فإن الهدف من هذه الدراسة هو تطوير فهم أساسي للسلوك الميكانيكي لعينات نوعين متميزين من الرمال (المكسرة والكثبان) المقواة بنسب مختلفة من ألياف الدوم تتراوح من 0% إلى 0.8%. تستخدم هذه الدراسة صندوق القص كازاغراندي وتهدف إلى تحديد مدى جدوى دمج هذه المواد في بناء الطبقات التحتية والسدود للطرق السريعة والسدود الترابية، مع تطوير استراتيجيات التصميم للحد من الأضرار الناجمة عن التمزقات والتشوهات والتسويات المفرطة لطبقات التربة التي تكون بمثابة دعم لمختلف مشاريع الأشغال العامة. أظهرت نتائج الاختبارات التي أجريت على مخاليط مختلفة التأثير الكبير لتكامل ألياف الدوم على السلوك الميكانيكي للترب الرملية. بالإضافة إلى ذلك، يلاحظ أن قوة القص القصوى تزداد بشكل متناسب مع كمية ألياف الدوم، حيث تصل قيمتها القصوى إلى 0.4% لرمال الكثبان و 0.6% للرمال المسحوق. ومع ذلك، بخلاف هذه المحتويات، لوحظ الاتجاه المعاكس لجميع العينات. بالإضافة إلى ذلك، يمكن إنشاء علاقة بين زاوية الاحتكاك ومحتوى ألياف الدوم باستخدام علاقة متعددة الحدود تمثل جميع المعلمات التي تم اختبارها. وأخيرا فإن المخاليط التي تحتوي على الرمل المسحوق وألياف الدوم تظهر قوة قص أعلى من مخاليط الرمل وألياف الدوم.

الكلمات المفتاحية: التوصيف الميكانيكي، ألياف الدوم، الرمال المسحوقة، رمال الكثبان الرملية، صندوق كازاغراندي..

Liste des symboles

a, b, c, d, e	Coefficients de l'équation
$A_{\text{corrigée}} (\text{mm}^2)$	Surface corrigée
Cc (-)	Coefficient de courbure
Cu (-)	Coefficient d'uniformité
C (kPa)	Cohésion
$D_{\text{max}} (\text{mm})$	Diamètre maximale des grains
D_{10}	Diamètre efficace ou diamètre correspondant à 10 % de tamisât
D_{30}	Diamètre correspondant à 30 % de tamisât
D_{60}	Diamètre correspondant à 60 % de tamisât
Dr (%)	Densité relative initiale
e	Indice des vides globale
e_{max}	Indice des vides maximal
e_{min}	Indice des vides minimal
DFC (%)	Teneur en fibres de doum
OCR (kPa)	Rapport de sur consolidation
R^2	Coefficient de détermination
$V_{\text{moule}} (\text{m}^3)$	Volume du moule
$V_s (\text{m}^3)$	Volume des grains solides
$V_t (\text{m}^3)$	Volume total d'échantillon
W(%)	Teneur en eau
Wsol (gr)	Masse de l'échantillon

γ_d (g/cm ³)	Poids volumique sec
γ_{sat} (g/cm ³)	Poids volumique saturé
γ_s (g/cm ³)	Poids volumique des grains solides
σ_n (kPa)	Contrainte normale initiale
T (N)	Résistance au cisaillement
τ_{max} (kPa)	Résistance au cisaillement maximale
ϕ (°)	Angle de frottement
τ/σ (kPa)	Résistance au cisaillement normalisée
Δh (mm)	Déplacement horizontal
Δv (mm)	Déplacement vertical

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les ouvrages de génie civil utilisent le sol comme un élément structurel clé qui transmet les charges vers les couches de sol suffisamment résistantes. En géotechnique, de nombreuses technologies modernes visent à améliorer la résistance des sols, un facteur crucial pour la stabilité des constructions et une activité majeure pour les ingénieurs civils, comme modifier leurs conditions initiales (densité, contrainte, pression de confinement, pré-chargement, etc.), les traiter avec des adjuvants (ciment, chaux, cendres volantes, laitier, etc.) ou les renforcer avec des matériaux comme des fibres artificielles, naturelles ou des géotextiles. Le choix de la technique dépend du type de sol et de la nature du projet. Cependant, l'utilisation de fibres naturelles, en particulier, reste limitée en géotechnique pour analyser leur influence sur le comportement mécanique des sols granulaires comme les sables. L'effet de l'ajout de fibres de doum sur les sables nécessite davantage de recherches pour comprendre le comportement de ces matériaux composites et enrichir les connaissances dans ce domaine. C'est pourquoi cette étude s'intéresse à l'impact des fibres de doum sur le comportement mécanique des sables ayant différentes formes des particules (dune et concassé).

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette investigation expérimentale est d'étudier l'effet de fibres de doum sur les caractéristiques mécaniques des mélanges sable (dune et concassé) -fibres de doum en utilisant l'appareil de cisaillement direct (boîte de Casagrande). Les échantillons des sables (dune et concassé) ont été mélangés avec une gamme de fibres de doum varie de DFc=0% à 0.8% et soumis à des contraintes normales initiales faibles ($\sigma_n=100, 200$ kPa et 400 kPa). Tous les échantillons ont été reconstitués au laboratoire avec une densité relative dense ($D_r=90\%$).

Ce mémoire est structuré en 04 chapitres essentiels :

Le premier chapitre présente une revue de la littérature portant sur l'étude de l'impact de différents types de fibres (artificielles ou naturelles) sur le comportement mécanique des sols sableux. Il met l'accent sur les travaux réalisés dans ce domaine, analysant les effets de l'incorporation de fibres sur la réponse mécanique des sables. Ce chapitre aborde aussi l'influence de différents paramètres clés sur le comportement mécanique des matériaux granulaires.

Le deuxième chapitre expose en détail le dispositif expérimental employé dans cette étude, ainsi que la méthodologie de l'essai réalisé avec la boîte de cisaillement de Casagrande.

Ensuite, nous abordons la caractérisation physique des matériaux utilisés, incluant les sable (dune et concassé) avec les fibres de doum, suivi du protocole suivi pour la préparation et la mise en place de nos échantillons en vue de l'exécution des divers essais mécaniques.

Le troisième chapitre présente en détail les résultats expérimentaux des essais de cisaillement direct effectués avec la boîte de Casagrande, visant à évaluer l'influence des fibres de doum sur le comportement mécanique des sols sableux (dune et concassé), en prenant en compte tous les paramètres sélectionnés.

Ensuite, le quatrième chapitre propose une analyse approfondie de l'impact de divers paramètres, tels que la forme des particules et la contrainte normale sur le comportement mécanique des mélanges de sables (dune et concassé) avec les fibres de doum.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1-Introduction

La réponse mécanique du sol réagit joue un rôle crucial dans de nombreux domaines de l'ingénierie. La mécanique des sols se penche sur ces réactions, examinant attentivement les caractéristiques, la composition et l'interaction du sol avec les structures et les fondations dans diverses conditions. Comprendre ce comportement est primordial pour ériger des fondations stables, garantir la sécurité des infrastructures de transport et mener à bien des projets de construction de manière efficace et rentable. Les argiles se comportent différemment des sols granulaires, et les avancées récentes en chimie des colloïdes et en minéralogie contribuent à étudier ce comportement. La mécanique des sols recourt à une variété de méthodes, telles que des essais en laboratoire et sur le terrain, pour analyser le sol et concevoir des fondations et des terrassements appropriés. Malgré sa richesse en connaissances, ce domaine rencontre des défis pratiques, notamment la variabilité des propriétés du sol, ce qui complique parfois la généralisation du comportement du sol sur un site donné.

1.2-Généralités sur les fibres et leurs impacts sur la réponse mécanique des sols

Babu et al. (2007) ont entrepris des essais triaxiaux sur un sable renforcé de fibres de noix de coco. Leurs échantillons, mélangés avec des concentrations de fibres de 0 %, 0,50 %, 1 % et 1,5 %, ont été soumis à deux niveaux de contrainte de confinement (100 et 150 kPa). Les fibres utilisées avaient une longueur de 15 mm et un diamètre de 0,25 mm. Leurs résultats ont mis en évidence l'impact significatif de la fraction de fibres sur la réponse mécanique du sable. En effet, la résistance au cisaillement a augmenté avec l'accroissement de la teneur en fibres (de 0 % à 1,5 %) pour les matériaux testés. De plus, ils ont noté que les échantillons de sable-fibres soumis à une contrainte de confinement de 150 kPa ont présenté une résistance au cisaillement supérieure à ceux soumis à une pression de confinement de 100 kPa, comme illustré dans la Figure 1.1.

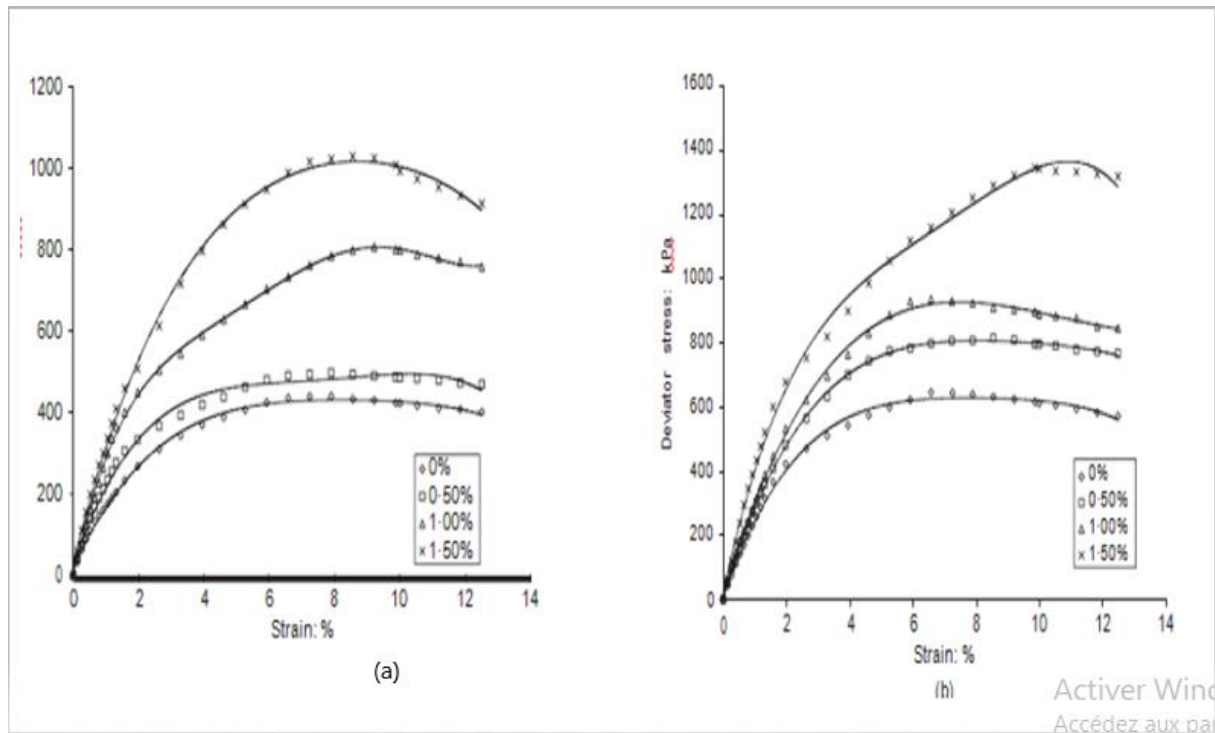


Figure 1.1: Réponse mécanique du sable renforcé par des fibres de noix de coco (a) 100 kPa. (b) 150 kPa
Babu et al. (2007)

Les recherches menées par Sujatha et al. (2020) ont exploré les caractéristiques mécaniques de l'argile, en se concentrant sur l'impact de deux types de renforts en fibre de verre (AR et E) sur sa résistance à la compression non confinée et à la corrosion. Ils ont préparé des échantillons avec différentes teneurs proportion de fibres (0%, 0,25%, 0,5%, 0,75% et 1%) et ont constaté que l'incorporation de fibre de verre avait un effet significatif sur la résistance à la compression du sol. Leurs résultats indiquent qu'une argile renforcée avec 0,75% de fibre de verre AR atteint une résistance à la compression maximale de 179 kPa à une déformation de 8,75%, tandis que celle renforcée avec la fibre de verre E atteint 137,87 kPa à 5,02% de déformation, comparé à seulement 71 kPa pour un échantillon non renforcé à une déformation de 4,8%. De plus, l'addition de fibres de verre a également conduit à une augmentation de la ductilité des argiles étudiées, comme illustré dans la figure 1.2.

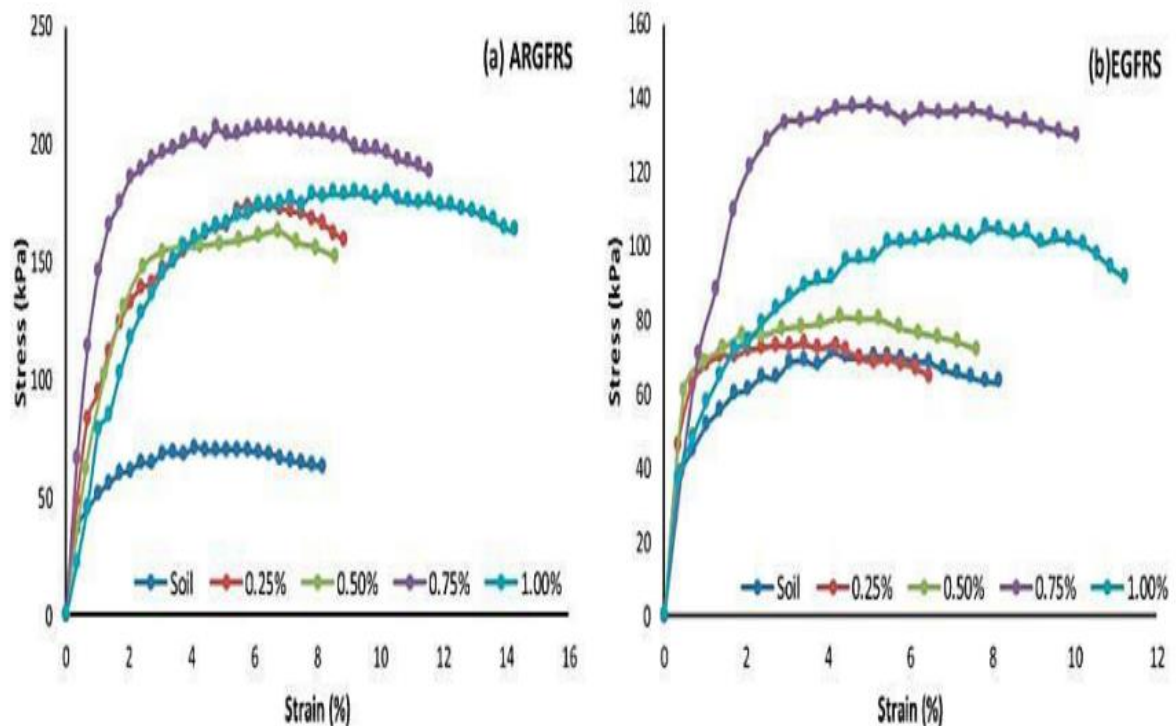


Figure 1.2: Réponse mécanique d'argile renforcé par des fibres de verres. Sujatha et al. (2020).

Malidarreh et al. (2017) ont examiné l'influence de trois types distincts de fibres (PP, PET et sacs) sur le comportement mécanique du sable lors d'essais triaxiaux drainés. Leurs échantillons ont été soumis à des pourcentages de fibres variant de 0 % à 1,5 % par incréments de 0,5 %, avec une pression de contrainte maintenue à 200 kPa. Leurs résultats ont démontré que la proportion de fibres avait un impact significatif sur la résistance au cisaillement drainé du sable testé : à mesure que la concentration en fibres augmentait de 0 % à 1,5 %, la résistance au cisaillement drainé augmentait de manière significative. En outre, ils ont observé que l'incorporation de fibres de polypropylène (PP) entraînait une augmentation de la résistance au cisaillement drainé plus marquée par rapport aux deux autres types de fibres (Polyéthylène Téréphtalate 'PET' et sacs), comme le montre la figure 1.3.

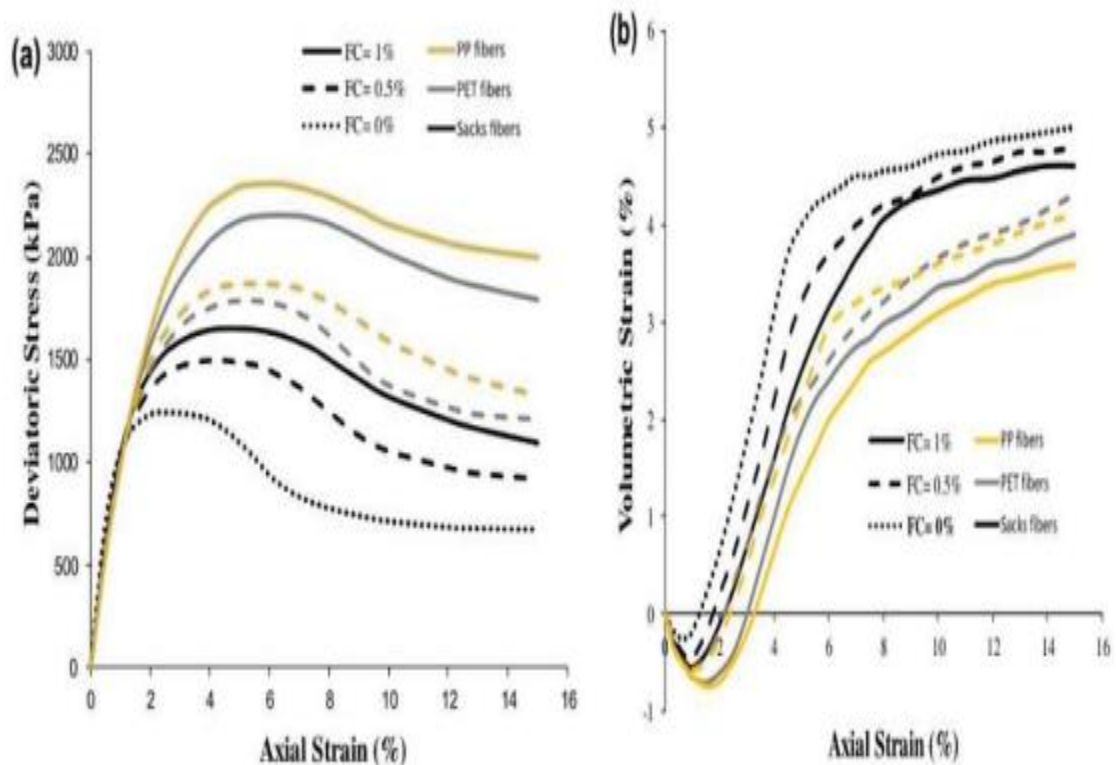


Figure 1.3 : Comportement mécanique drainé pour le sable renforcé par trois différents types des fibres.

Malidarreh et al. (2017)

Missoum et al. (2021) ont mené des essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande dans le but d'étudier l'effet de la fraction de fibres sur la réponse mécanique du sable de Chlef. Leurs spécimens ont été préparés avec trois types différents de fibres (verre, polypropylène et sisal) pour des concentrations variant de 0 % à 1 %, avec une densité relative de 50 % et soumis à une contrainte normale de $\sigma_n = 100$ kPa. Leurs résultats ont souligné l'importance cruciale de l'ajout de fibres dans la matrice sable-fibres pour l'étude du comportement mécanique des sols étudiés. De plus, ils ont observé que les échantillons renforcés par des fibres de sisal semblaient présenter une résistance plus élevée que ceux renforcés par des fibres de verre et des fibres de polypropylène. Par ailleurs, ils ont noté que la résistance au cisaillement augmentait avec l'augmentation de la concentration de fibres jusqu'à une teneur optimale de 0,5 % pour les fibres de verre, 0,75 % pour les fibres de polypropylène et les fibres de sisal. Au-delà de ces valeurs, la résistance diminuait avec l'augmentation de la concentration de fibres pour les trois mélanges sable-fibres, comme illustré dans la Figure 1.4.

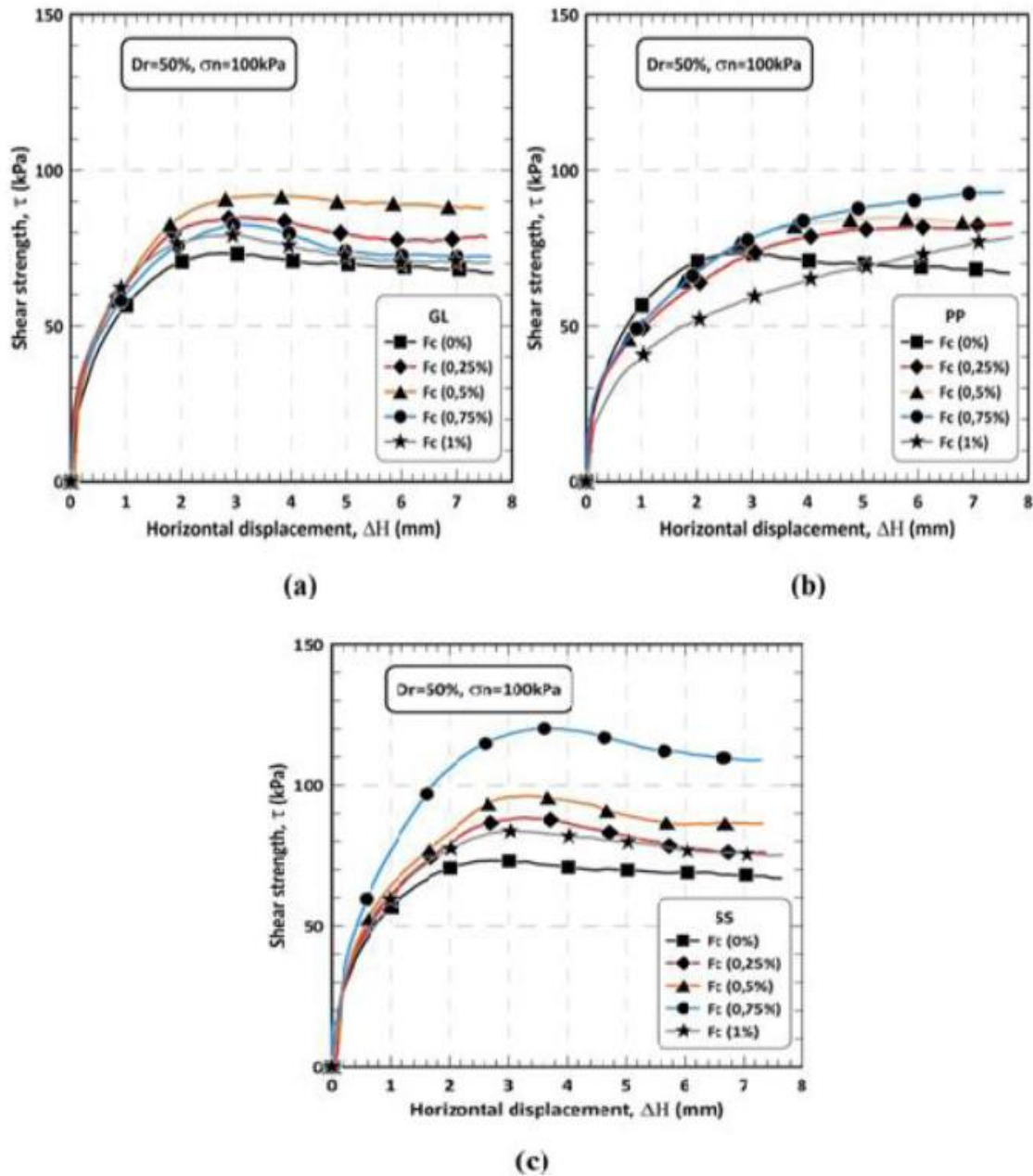


Figure 1.4: Réponse mécanique d'un mélange sable de Chlef-fibres (a) Fibres de verre (B) Fibres de polypropylène (c) Fibres de sisal. Missoum et al. (2021)

Nahar et Messaadia (2022) ont étudiés l'effet de la teneur en fibres de palmier (Fp) sur la résistance au cisaillement des mélanges de fibres et sable de dunes. Les tests ont été menés avec des teneurs en fibres allant de 0 % à 1,2 % par incréments de 0,2 %. Deux densités relatives initiales du mélange de sable ont été considérées ($D_r = 50\%$ et $D_r = 92\%$) avec une contrainte normale initiale de 100 kPa. Les résultats montrent que l'ajout de fibres de palmier a un impact significatif sur le comportement mécanique des mélanges. La résistance

au cisaillement augmente avec la teneur en fibres de palmier jusqu'à une teneur optimale de 0,4 %. Au-delà de ce seuil, une diminution de la résistance au cisaillement est observée. Par exemple, pour un mélange de sable de dune avec $F_p = 0,4\%$, la résistance au cisaillement est maximale, mais au-delà de ce seuil, la résistance diminue. Ceci est dû au fait que les fibres de palmier favorisent la formation de pores dilatés qui sont comprimés pendant le processus de cisaillement, réduisant ainsi la résistance.

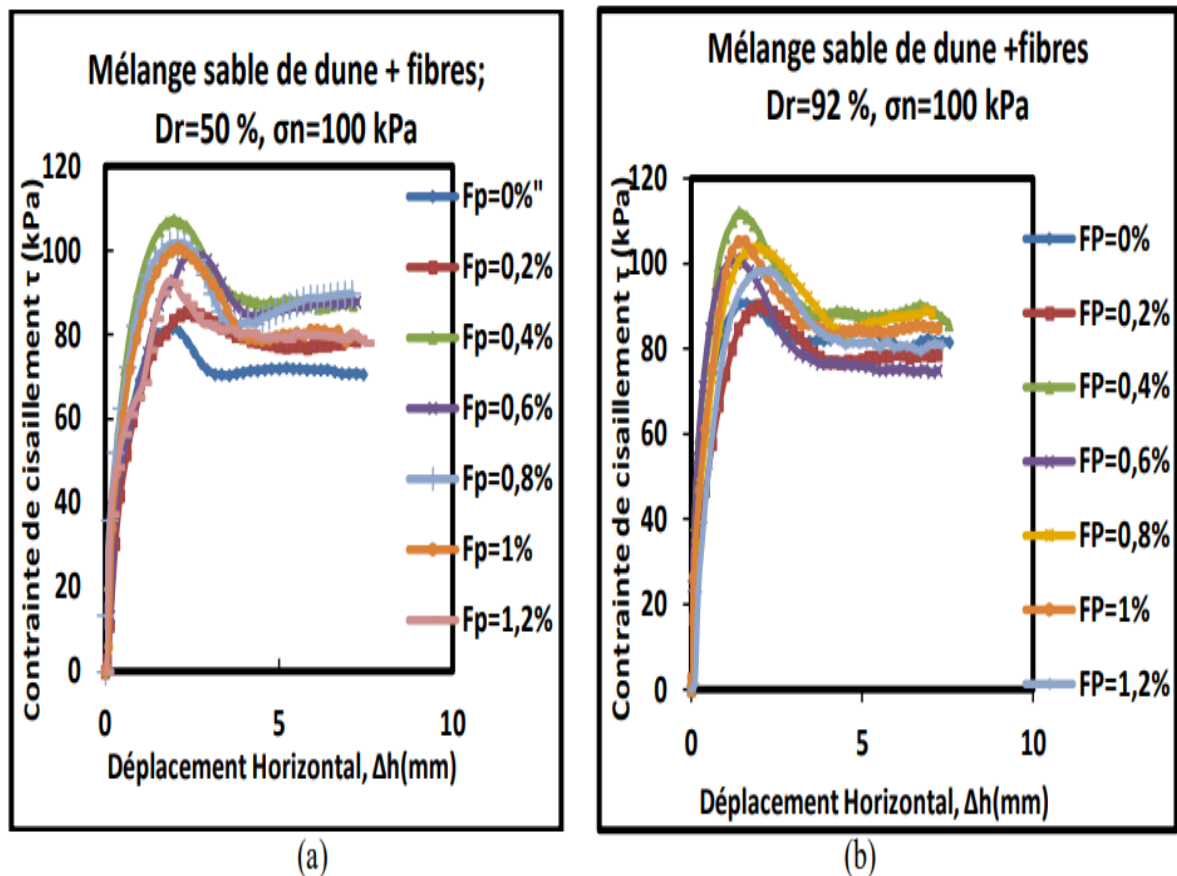


Figure 1.5: Comportement mécanique des mélanges sable de dune –fibres (a)- $D_r=50\%$, (b)- $D_r=92\%$. Nahar et Messaadia (2022)

Elakeb et Elhabchi (2023) ont examiné l'impact des fibres de Doum ($F_d = 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1\%$) sur la résistance au cisaillement des mélanges de fibres de sable de Chlef, les résultats de l'étude sont présentés dans les figures 1.6 et 1.7. Leurs échantillons ont été préparés en mélangeant du sable et des fibres de sol de Chlef selon la méthode de dépôt sec et soumis à une contrainte normale initiale à deux densités relatives initiales ($D_r = 50$ et 90%) ($\sigma_n = 100$ kPa). Elles ont trouvé clairement que l'ajout de fibres de Doum a un impact significatif sur le comportement mécanique des mélanges de sable de Chlef à différentes densités relatives initiales. La résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la

teneur en fibres de Doum jusqu'à un seuil de contenu ($F_d = 0,4 \%$). De plus, une résistance au cisaillement accrue est observée par rapport à des échantillons sans fibres ($F_d = 0 \%$). Au-delà de ce seuil ($F_d = 0,4 \%$), une réduction de la résistance au cisaillement est constatée pour les échantillons ayant une teneur en fibres de Doum à $0,4 \%$. Cette réduction est due à la formation de macropores favorisée par la présence de fibres de Doum, entraînant une augmentation de l'indice de vide. Au fur et à mesure que la fraction de fibres de Doum augmente, la phase de dilatance augmente progressivement jusqu'au seuil de $0,4 \%$. Au-delà de ce seuil, une réduction significative de la phase de dilatance est observée pour les fractions de fibres supérieures à $0,4 \%$, ce qui entraîne une compression plus facile des grands pores pendant l'étape de cisaillement de l'échantillon et empêche le contact entre les particules.

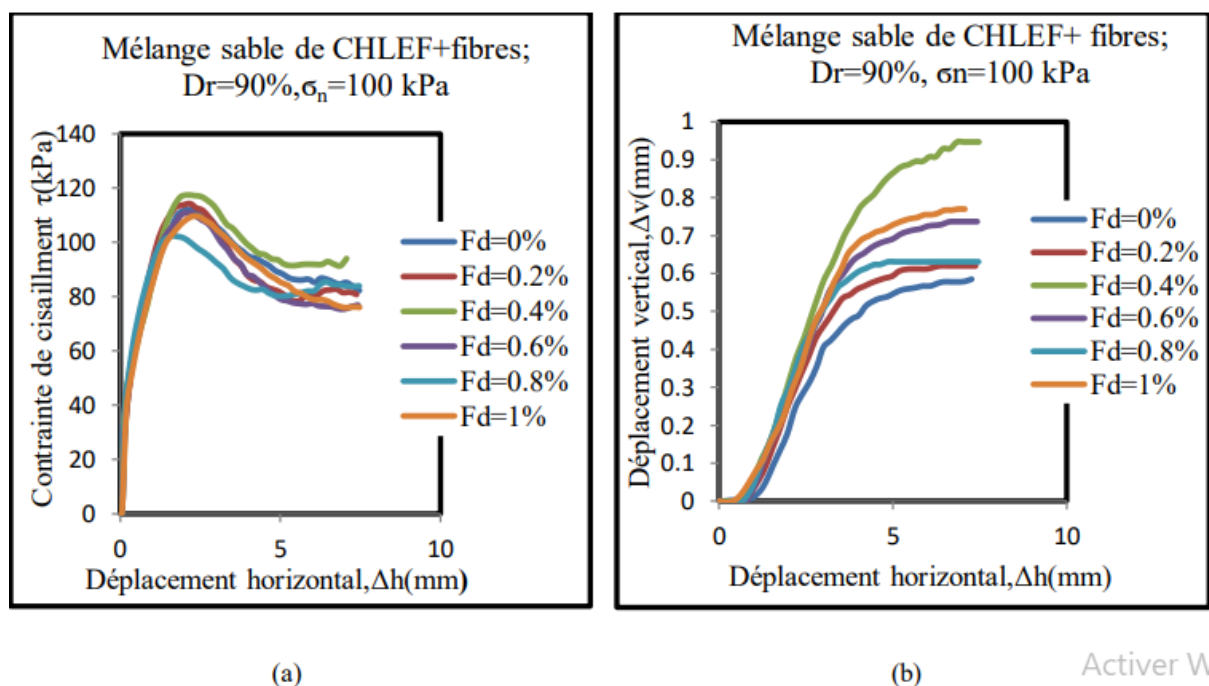


Figure 1.6 : Comportement mécanique des mélanges sable de Chlef- fibres de doum ($\sigma_n = 100 \text{ kPa}$; $D_r = 90\%$)

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical

Elakeb et Elhabchi (2023)

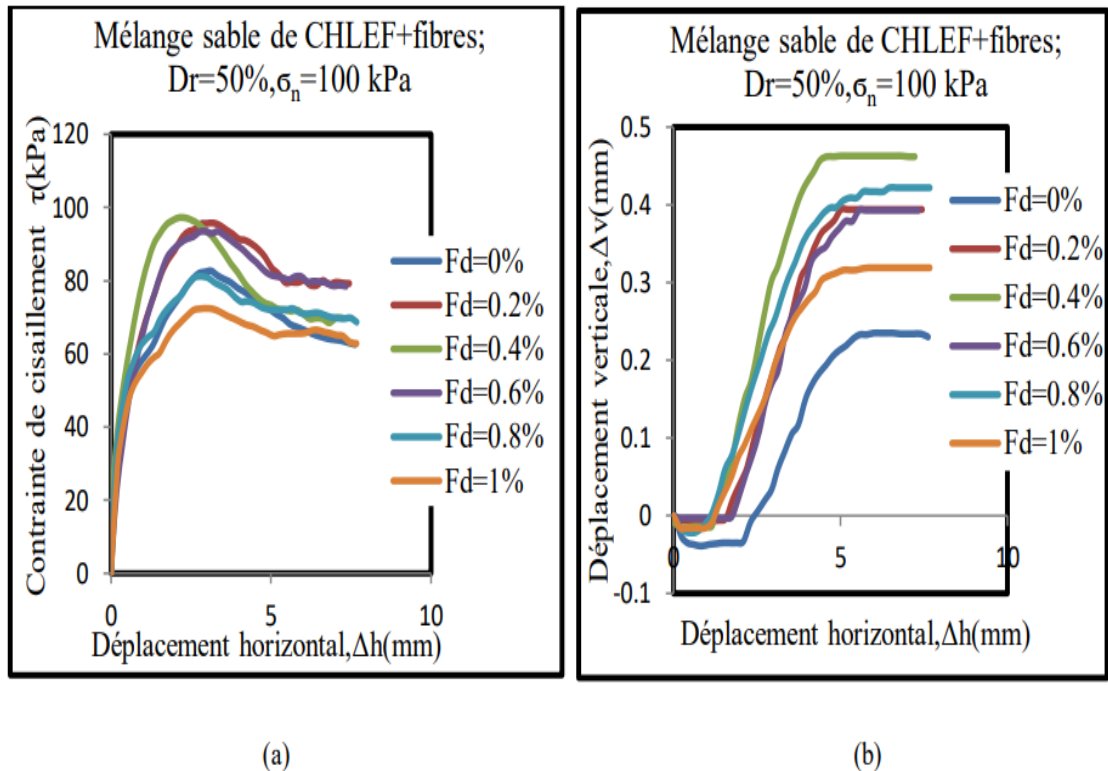


Figure 1.7 : Comportement mécanique des mélanges sable de CHLEF- fibres ($\sigma_n=100$ kPa ; $D_r = 50\%$)

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical

Elakeb et Elhabchi (2023)

1.3-Effet de quelques facteurs sur la réponse mécanique des sols

La résistance au cisaillement du sol est influencée par divers paramètres mécaniques, tels que le degré de surconsolidation, la proportion de fines, la conductivité hydraulique et les schémas de sédimentation.

1.3-1 Effet du rapport de surconsolidation

Della et al. (2011) ont mené des tests triaxiaux sur des échantillons de sable afin d'examiner l'impact du taux de surconsolidation (OCR) sur le comportement non drainé du sol granulaire. Leurs résultats ont révélé une corrélation positive entre le taux de surconsolidation et la résistance au cisaillement non drainé du sol. Plus précisément, l'augmentation du taux de surconsolidation a été associée à une augmentation de la résistance au cisaillement non drainé du sable de Chlef. Ces recherches suggèrent que le taux de surconsolidation peut jouer un rôle dans l'augmentation de la résistance des particules et, par conséquent, dans l'amélioration de la résistance au cisaillement non drainé du sol granulaire, comme illustré dans la figure 1.8.

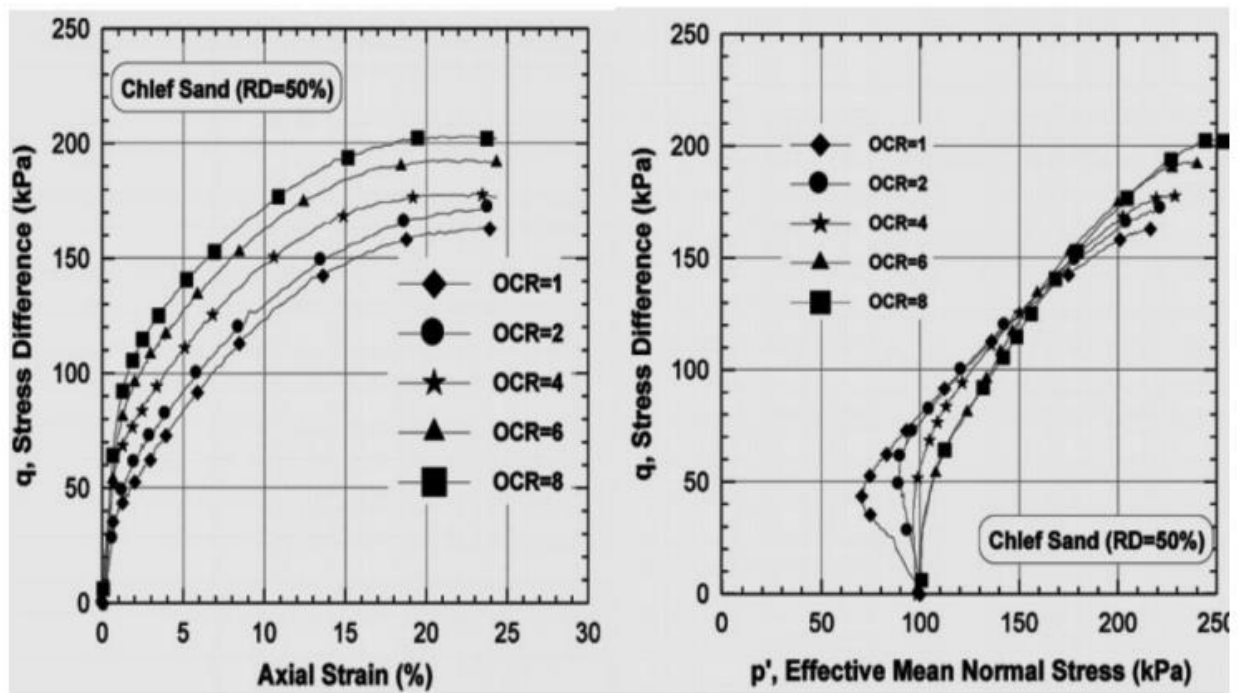


Figure 1.8 : Influence de rapport de surconsolidation sur le comportement monotone du sable de Chlef

(Della et al 2011)

Arab et Belkhatir (2012) ont entrepris des expériences afin d'explorer la relation entre la résistance au cisaillement surconsolidée et non drainée des mélanges de sable-sol, en utilisant deux niveaux de surconsolidation différents ($OCR = 1$ et $OCR = 5$) et trois amplitudes de chargement cyclique sur des échantillons de sable provenant d'Oued Rass. Leurs résultats ont révélé que pour la charge cyclique la plus élevée ($q_m = 60$ kPa), le sol surconsolidé a présenté une diminution de résistance après 8 cycles, tandis que le sol normalement consolidé a montré une diminution après 5 cycles. De plus, pour une amplitude de $q_m = 40$ kPa, le sol surconsolidé a montré une tendance à augmenter la résistance après 26 cycles, tandis que le sol normalement consolidé a montré une diminution de résistance après 8 cycles. Ces résultats sont représentés graphiquement dans la figure 1.9.

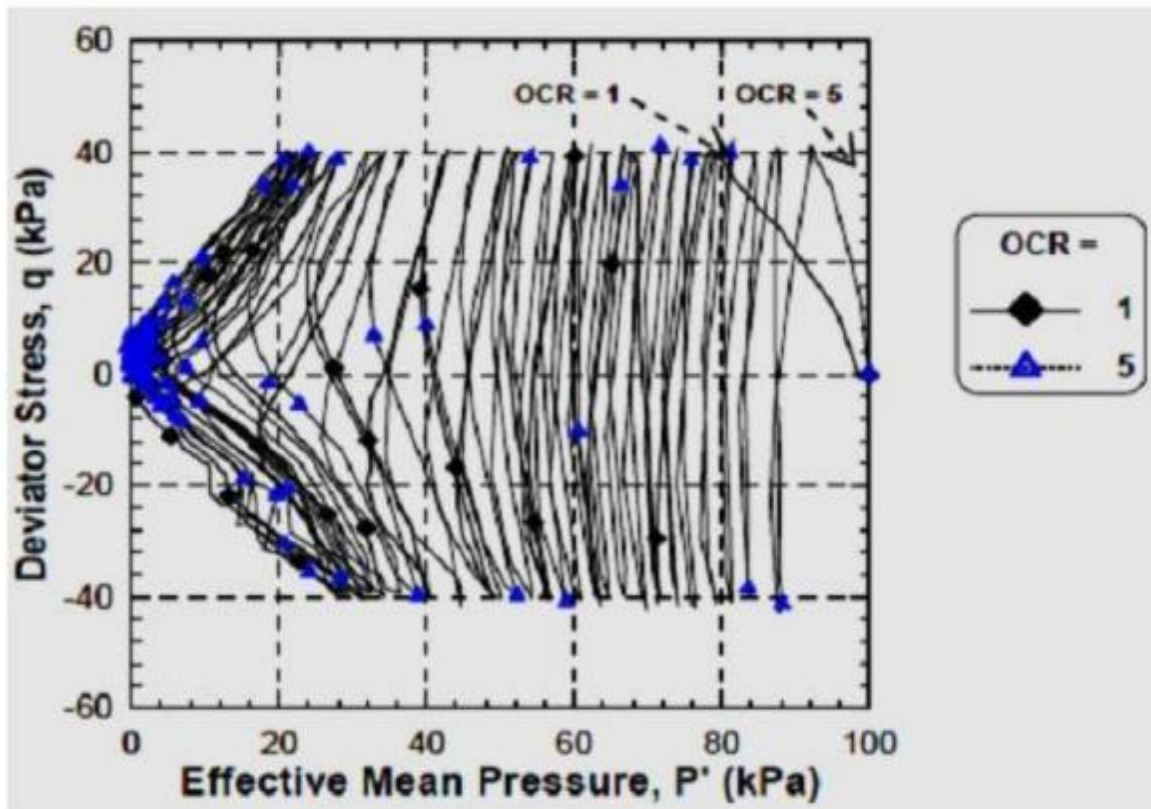


Figure 1.9: Influence de rapport de surconsolidation sur le comportement cyclique du sable d'oued Rass (Arab et Belkhatir et al. (2012))

1.3.2 Effet de la teneur en fines

Troncoso (1990) a étudié la résistance au cisaillement cyclique du sable mélangé à différentes quantités de fines (limons), variant de 0 % à 30 %, tout en maintenant un indice des vides initial constant à $e = 0,85$. Ses résultats ont montré que l'accroissement du rapport de fines réduisait la résistance aux forces de cisaillement cycliques. De manière similaire, Koester (1994) a observé que, sur la base de ses résultats obtenus à partir d'échantillons contenant diverses proportions de fines ($F_c = 0$ à $F_c = 60$ %) à un indice des vides initial de $e = 0,48$, que la résistance cyclique diminue avec l'augmentation de la quantité de fines. Ces recherches suggèrent que la présence de fines facilite la séparation des forces interparticulaires entre les gros grains de sable, ce qui conduit à une réduction de la résistance au cisaillement cyclique dans un mélange sable-sol, comme illustré dans la figure 1.10.

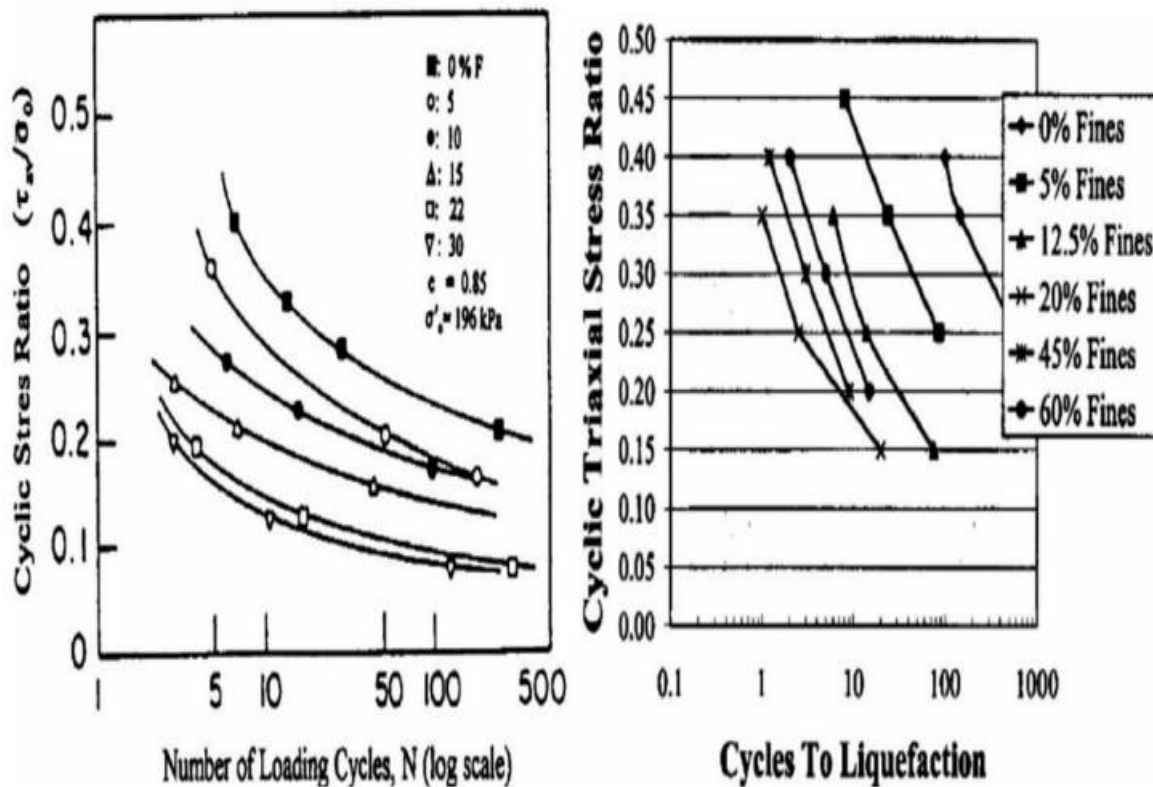


Figure 1.10 : Effet de fines sur la résistance au cisaillement non drainée du sol ((a)-Trancoso1990)
((b)Koester1994)

Les recherches menées par Flitti et al. (2016) ont impliqué des essais de cisaillement utilisant la boîte de Casagrande afin d'évaluer l'impact des fines sur les propriétés mécaniques du sol, notamment la cohésion et l'angle de frottement. Les échantillons de mélange sable-limon ont été préparés en laboratoire à une densité relative de 88 %. Leurs résultats ont démontré une diminution de l'angle de frottement avec l'augmentation de la proportion de fines, tandis que la cohésion augmentait avec cette augmentation. Cette observation s'explique par la présence accrue de particules fines entre les grains de sable, ce qui diminue la liaison entre les gros grains de sable, entraînant ainsi une réduction de la résistance au cisaillement, comme illustré dans la figure 1.11.

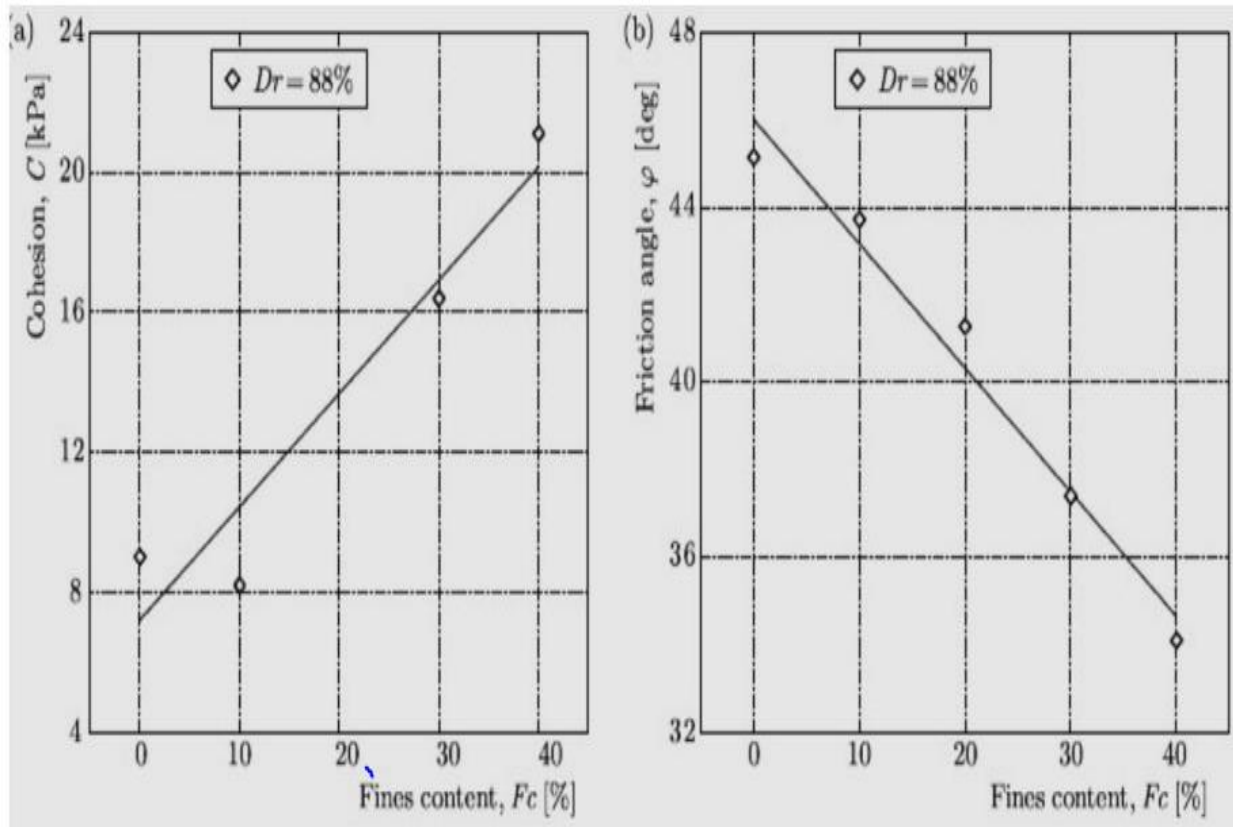


Figure 1.11: (a) variation des propriétés mécanique avec la teneur en fines cohésion versus teneur en fines, (b) angle de frottement en fonction de teneur en fines (Flitti et al 2016).

1.3.3 Effet de la conductivité hydrauliques

D'après plusieurs études dans la littérature, il est bien établi que la conductivité hydraulique joue un rôle déterminant dans la réponse mécanique des sols, en particulier pour les mélanges de sable-limon. Belkhatir et al. (2012) ont examiné l'impact de la conductivité hydraulique sur la résistance au cisaillement non drainé des mélanges sable-limon. Leurs conclusions ont mis en évidence l'importance significative de la conductivité hydraulique sur cette résistance, notant une diminution de celle-ci lorsque le logarithme de la conductivité hydraulique (k_{sat}) baisse. Leurs observations ont été réalisées pour des valeurs de densité relative initiale de 20 % et 90 %. Cette tendance est clairement illustrée dans la figure 1.12.

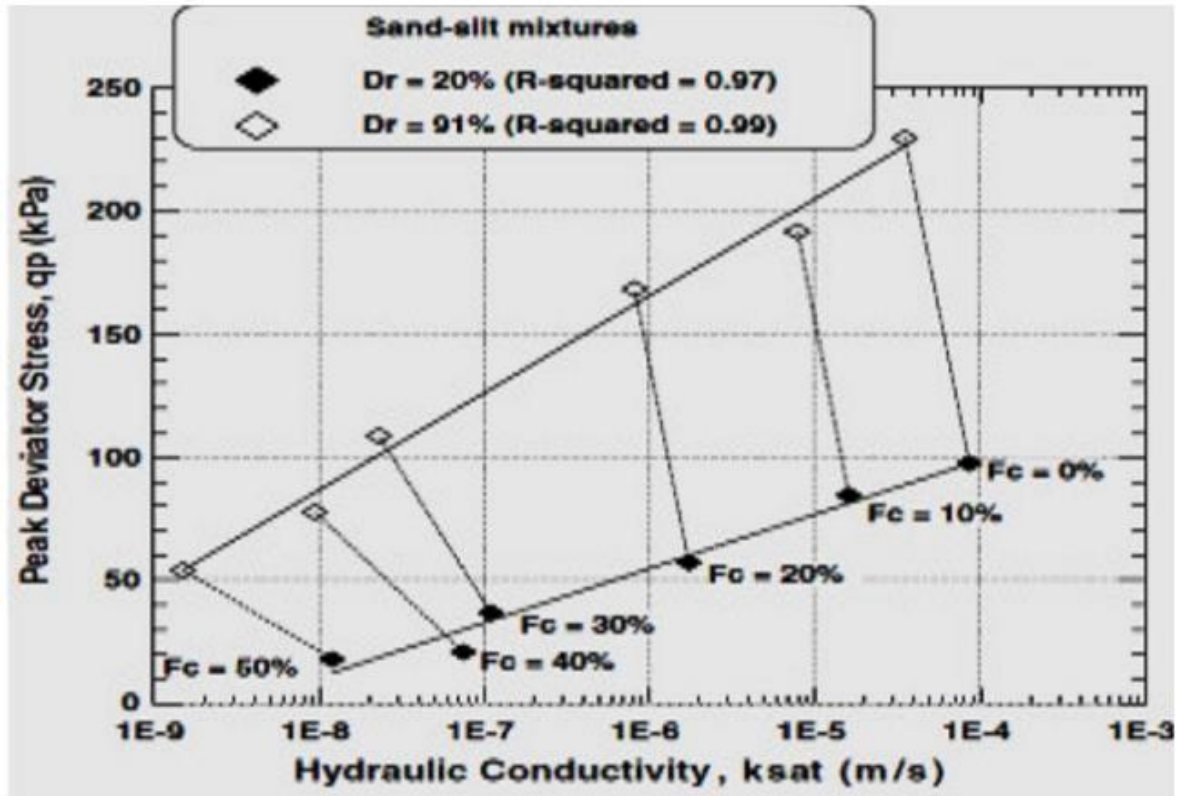


Figure 1.12 : L'effet de la conductivité hydraulique sur la résistance au cisaillement non drainée (Belkhatir et al 2012).

1.3.4 Effet de la mode de dépôt

Plusieurs chercheurs ont exploré l'impact des méthodes de préparation des échantillons sur le comportement mécanique des sols. Mulilis et ses collaborateurs ont mené des essais triaxiaux en 1977 sur le sable de Monterey, reconstitué en laboratoire selon deux méthodes différentes : Damage humide et pluviation à sec, avec une pression de confinement de $P'_c=54$ kPa et une densité relative de D_r de 50 %. Leurs résultats ont révélé une résistance au cisaillement plus élevée pour les échantillons préparés par damage humide par rapport à ceux préparés par pluviation à sec, comme illustré dans la figure 1.13.

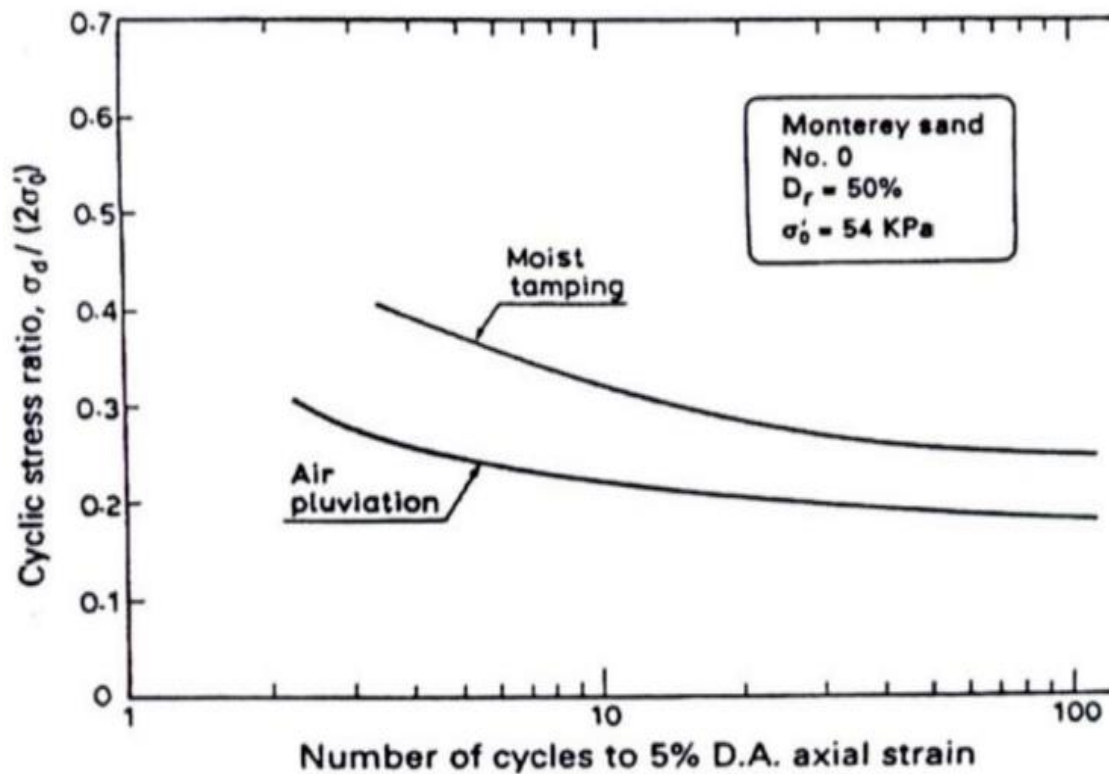


Figure 1.13 : Influence du mode de préparation sur la résistance au cisaillement non drainée (Mulilis et al 1977)

Della et al. (2011) ont mené une étude sur l'impact de la méthode de dépôt sur la réponse non drainée du sol de Chlef en effectuant des essais triaxiaux monotones. Ils ont reconstitué les échantillons en utilisant les techniques de pluviation à sec et de damage humide, avec une densité relative initiale (D_r) de 80 % et des pressions de confinement humide de 50, 100 et 200 kPa. Leurs observations ont révélé que les échantillons préparés par la technique de pluviation à sec étaient plus stables que ceux préparés par la méthode de damage humide, montrant un comportement de contraction, comme illustré dans la figure 1.14.

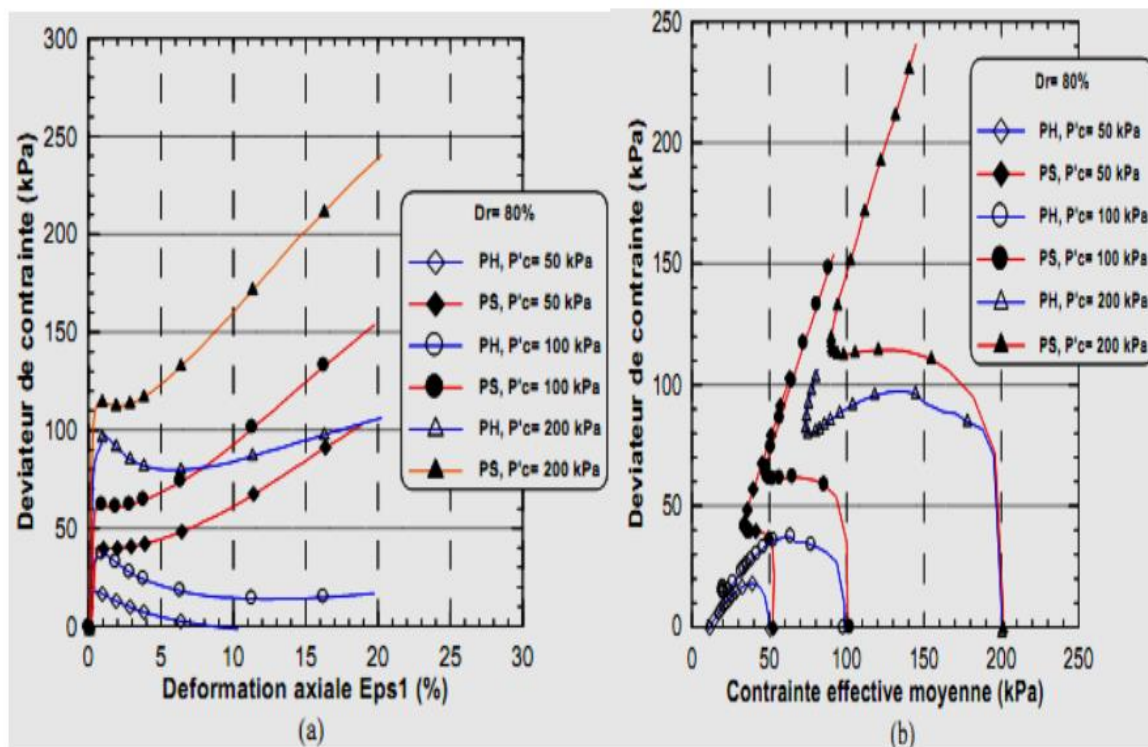


Figure 1.14: Effet de la méthode de déposition sur la réponse non drainée du sol de Chlef, (a) courbe de cisaillement, (b) chemin de contrainte, Della et al. (2011).

1.4. Conclusion

Ces dernières années, les ingénieurs géotechniciens ont de plus en plus recours à l'utilisation de fibres pour renforcer la stabilité et améliorer le comportement mécanique des sols. En outre, ce chapitre met en évidence d'autres facteurs importants pour la caractérisation mécanique des sols, tels que le taux de surconsolidation, la teneur en fines, la conductivité hydraulique, le mode de dépôt, entre autres. La présence de fibres constitue également un paramètre crucial pour influencer le comportement mécanique du sol, nécessitant des études expérimentales approfondies menées en laboratoire. Dans cette optique, des expériences ont été réalisées pour évaluer les effets des fibres sur la résistance au cisaillement des sols sableux, notamment les sols concassés et les dunes. Les prochaines sections décrivent l'utilisation d'un dispositif de cisaillement direct, la boîte de Casagrande, employé pour examiner l'impact du contenu en fibres de doum sur la réponse mécanique du sable concassé et sable de dune.

CHAPITRE II

DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET

PROCEDURE DE L'ESSAI

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons en détail le dispositif expérimental que nous avons utilisé dans notre étude, ainsi que les procédures d'essai utilisant l'appareil de cisaillement Casagrande. Nous détaillerons également les caractéristiques physiques des matériaux testés, constitués d'un mélange des sables (concassé et dune) avec les fibres de doum. Enfin, nous décrirons les méthodes employées pour la reconstitution et la préparation des échantillons en vue de réaliser différents essais de cisaillement direct.

2.2. Dispositif expérimental

2.2.1. Introduction

Différents types d'essais en laboratoire ont été effectués pour examiner la réponse mécanique des sols granulaires. Ces essais sont réalisés sur des mélanges de sable comprenant divers pourcentages de fibres de doum, en utilisant des instruments et des équipements spécialisés tels qu'un appareil de cisaillement direct de type "boîte de Casagrande", comme illustré dans la figure 2.1.



Figure 2.1 : Appareil de cisaillement utilisé dans cette étude.

2.2.2 But de l'essai

L'objectif principal de cet essai est d'évaluer les propriétés mécaniques du sol en effectuant des essais de cisaillement direct à l'aide d'une boîte Casagrande, qui permet de soumettre l'échantillon à une charge constante tout en subissant un cisaillement rectiligne. Cet essai a été utilisé pour étudier l'influence de teneur en fibres de doum sur les

caractéristiques mécaniques du sable concassé et sable de dune. Il permet aussi d'obtenir la courbe intrinsèque du sol étudié et de déterminer son angle de frottement interne φ et sa cohésion C .

2.2.3 Eléments constituant la boîte de cisaillement

Le dispositif de cisaillement comprend les éléments de base suivants :

- a. Pierres poreuses : utilisé pour le drainage de l'échantillon 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 est fixe et elle sert de moule.
- d. Dispositif à contrainte contrôlée : qui entraîne la demi-boîte inférieure à une vitesse constante la mesure de la contrainte de cisaillement τ est effectuée par un dynamomètre Figure (2.2).

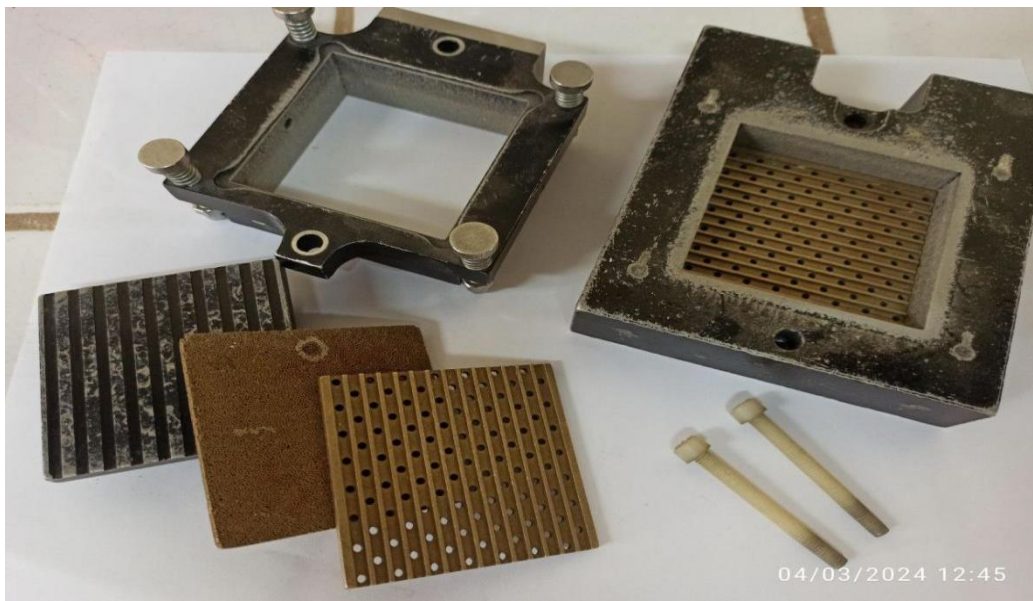


Figure 2.2: Composants de la boîte de cisaillement direct.

2.2.4. Description de l'essai

Pour évaluer les propriétés mécaniques des sols, l'essai de cisaillement en boîte Casagrande est couramment utilisé. Cette méthode implique de 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 une force

tangentielle T sont appliquées à l'échantillon selon la symétrie de la boîte. La contrainte normale est généralement fixée à des valeurs prédéfinies ($\sigma_n = 100 \text{ kPa}$, 200 kPa et 300 kPa), tandis que la contrainte tangentielle est calculée selon une procédure spécifique :

- Calculer la surface initiale de la boîte qui est gale ($6 * 6 = 36 \text{ cm}^2$).
- Calculer la surface corrigée : $(L-\Delta L) * L$. $\Delta L = \Delta L_{pic} = \text{vitesse de déformation} * \text{temps} = \text{Déformtion} * t$.
- La vitesse de déformation appliquée est fixe durant tout l'essai. Les sols pulvérulents : 1 mm/ min . Les sols cohérents UU ou CU : 1.5 mm/ min .
- La contrainte de cisaillement τ est égale au rapport de l'effort tranchant T appliqué à la boîte à celui de la surface corrigée « A corrigée » $\tau = T/A_{corrigée}$.

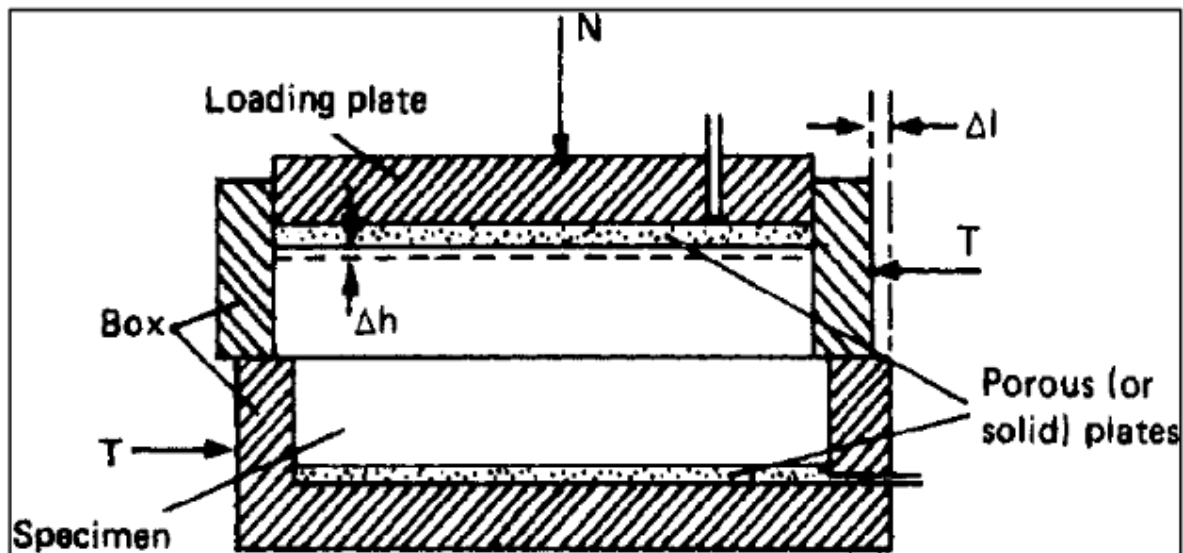


Figure 2.3 : Principe de l'essai de cisaillement direct.

2.2.5 Détermination des caractéristiques intrinsèques de sols

En réalisant plusieurs essais de cisaillement à différentes contraintes normales et tangentielles, il est possible de déterminer la courbe intrinsèque de l'échantillon de sol et de tracer la courbe Coulomb ou Mohr-Coulomb. Cette courbe permet de définir les valeurs de cohésion c et d'angle de frottement ϕ , comme illustré dans la figure 2.4. La répétabilité des essais de cisaillement est cruciale pour obtenir des résultats fiables.

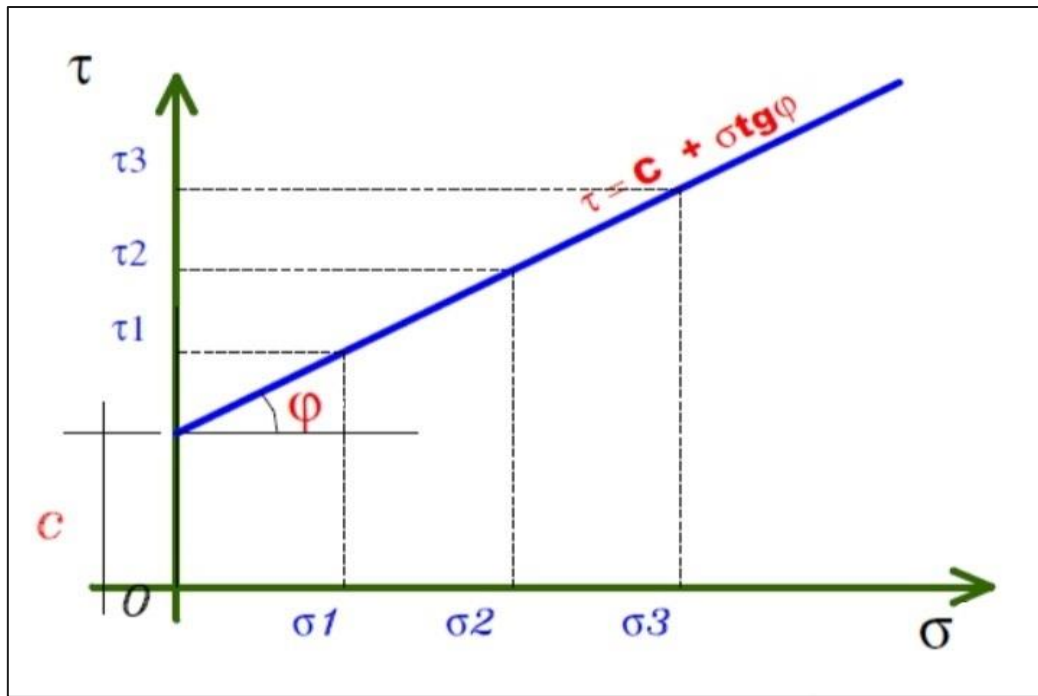


Figure 2.4 : La courbe intrinsèque des sols.

2.3. Matériaux testés

Les essais en boîte de cisaillement direct ont été effectués sur des mélanges de sols sableux (sable dune et sable concassé) avec les fibres de doum variant de (DFc=0%, 0.2%, 0.4%, 0.6% et 0.8%). Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont illustrés à la Figure (2.5). Les caractéristiques des matériaux étudiés sont présentées dans le tableau (2.1). Les courbes granulométriques des échantillons examinés sont montrées sur la Figure (2.6). Deux types de fibres ont été utilisés dans cette étude. La première est une fibre non traitée, produite à partir de tiges de plantes séchées (partie centrale). Après la collecte, les tiges sont coupées à la main en longueurs de 15 mm. Les autres fibres sont extraites des tiges de la plante verte. Les tiges vertes sont d'abord lavées à l'eau pour enlever la poussière, puis coupées en petits morceaux à la main, mesurant environ 15 mm de longueur et 2 mm de largeur ou moins. Ensuite, les fibres obtenues sont trempées dans une solution contenant environ 3% de NaOH et laissées à température ambiante pendant 30 minutes. Elles sont ensuite rincées à l'eau du robinet et à l'eau distillée pour éliminer les dernières traces de soude qui pourraient rester collées à leur surface. Enfin, les fibres sont séchées dans une étuve à 60°C pendant 24 heures. Ces fibres sont appelées fibres vertes transformées ou simplement fibres traitées (figure 2.5).



Figure 2.5 : Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale.

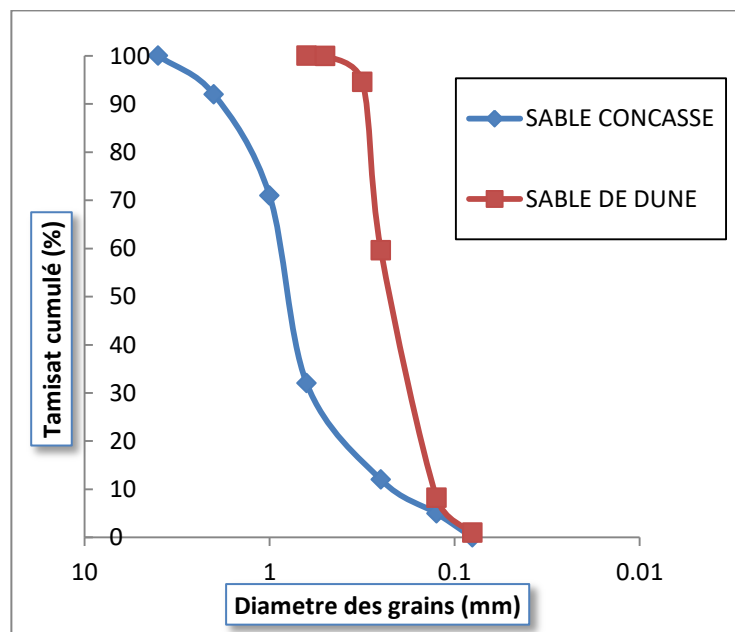


Figure 2.6: Courbes granulométriques des matériaux utilisés (sable concassé et sable dune).

Tableau 2.1: Propriétés physiques du sable dune et concassé.

Matériaux utilisées	F _d %	G _s	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u (-)	C _c (-)	e _{max} (-)	e _{min} (-)
Sable dune	0	2.62	0.265	0.431	0.7	2.641	1.001	0.905	0.596
Sable concassé	0	2.61	0.214	0.598	0.895	4.182	1.867	0.809	0.465

2.4. Procédure de l'essai

2.4.1 Introduction

Afin d'effectuer les essais de cisaillement, il est primordial de préparer une quantité adéquate de l'échantillon du mélange sable-fibre de doum, suffisante pour réaliser au minimum trois essais avec différentes charges. Le choix de la boîte de cisaillement "Casagrande" est déterminé par la nature du sol testé, les sols pulvérulents nécessitant une boîte carrée et les sols cohérents étant préférablement testés dans une boîte circulaire. Il est crucial que la largeur ou le diamètre intérieur de la boîte soit supérieur à 5 cm, mais jamais inférieur à dix fois le diamètre équivalent des plus grosses particules, pour les sables. Une boîte de cisaillement carrée de 6 cm de côté est couramment utilisée pour ces essais.

2.4.2 Reconstitution de l'échantillon

Les mélanges du sable concassé et sable de dune avec les fibres de doum ont été préparés en laboratoire à partir de différents matériaux. La proportion de fibre de doum (DFc = 0%, 0,2%, 0,4% et 0,6% et 0,8%). La méthode de préparation utilisée est la « déposition sec ». La méthode consiste à utiliser avec une densité relative initiale (D_r =90 %) et trois contraintes normales initiales (σ_n= 100 kPa, 200 kPa et 400 kPa). La détermination de la quantité de matériau correspondant aux différents états de sols est basée sur l'utilisation des paramètres suivants : D_r, e_{min} et e_{max} comme suite :

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

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

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

Ou bien :

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

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

(V_t=volume du moule est 90 cm²).

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

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

La masse des fibres ont déterminé comme suite :

$$M_{\text{fibres}} = (DFc * M_{\text{sol}}) / 100$$

DFc : pourcentage de fibres

Tableau 2.2 : Les masses calculées pour les échantillons testés.

Pourcentage des fibres de doum (%)	Densité relative Dr (%)	Masse de sol (g)		Masse de fibre (g)	
		Sable dune	Sable concassé	Sable dune	Sable concassé
0	90	146,59	159,06	0	0
0,2	90	146,3	158,74	0,29	0,31
0,4	90	146,01	158,42	0,58	0,63
0,6	90	145,72	158,11	0,87	0,94
0,8	90	145,43	157,8	1,16	1,26

2.4.3 Mise en place de l'échantillon dans la boîte

Les deux demi-boîtes étant verrouillées, on place successivement :

- Le fond de boîte ;
- Une pierre poreuse ;
- Une plaque striée (pierre poreuse et piston), les stries étant perpendiculaires au sens de cisaillement (les plaques perforées permettent les essais drainés, les plaques pleines sont utilisées pour les essais non drainés) ;
- l'échantillon de sol.

2.4.4 Mise en place de la boîte sur la machine

- Placer l'étrier de charge sur le piston de la boîte ;
- Placer le comparateur vertical et le mettre à zéro ;
- Monter l'anneau dynamométrique sur la machine, le relier à la boîte et compenser les jeux en mettant l'anneau légèrement en traction et en ramenant lentement le comparateur de l'anneau au zéro ;
- Appliquer sur l'éprouvette la charge désirée, en principe :
 - Pour un sol pulvérulent : 100 - 200 - 400 kPa ;

2.4.4 Lectures

Les déplacements horizontaux et verticaux ainsi que les contraintes tangentielles sont mesurés au moyen de capteurs et de contrôleurs intégrés à un système d'acquisition informatique. L'essai est arrêté lorsque la contrainte de cisaillement devient constante ou lorsqu'une déformation horizontale de 7.5 mm est atteinte.

2.5 Conclusion

Ce chapitre détaille les méthodes et les outils utilisés pour analyser le comportement mécanique des mélanges de sable concassé et de sable de dune contenant différentes proportions de fibres de doum ($DF_c = 0\%, 0,2\%, 0,4\%, 0,6\%$ et $0,8\%$). La technique de préparation par déposition à sec a été employée pour reconstituer les échantillons en laboratoire, lesquels ont été soumis à des contraintes normales initiales ($\sigma = 100\text{kPa}, 200\text{kPa}$ et 400kPa) et à une densité relative initiale ($Dr = 90\%$). Les essais ont été réalisés à l'aide de l'appareil de cisaillement direct, en adaptant la procédure d'essai pour tenir compte de la structure des mélanges afin de produire des échantillons homogènes. De plus, les caractéristiques granulométriques et physiques des mélanges sable (concassé et dune) - fibres de doum ont été exposées. Les chapitres suivants se concentreront sur l'étude de la réponse mécanique de ces mélanges, en mettant en lumière l'effet de la proportion de fibres de doum sur le comportement mécanique du sable concassé et du sable de dune.

CHAPITRE 3

**INFLUENCE DE LA TENEUR EN
FIBRES DE DOUM SUR LE
COMPORTEMENT MECANIQUE DES
SOLS SABLEUX (DUNE ET CONCASSE)**

3.1 Introduction

De nombreuses études en laboratoire ont été menées pour évaluer l'impact de différents types de fibres (verre, polypropylène, sisal, etc.) sur les propriétés mécaniques des sols sableux, dans le but d'améliorer leur résistance au cisaillement. Babu et Vasudevan (2007) ont réalisé des essais triaxiaux sur du sable renforcé de fibres de noix de coco, montrant que plus la teneur en fibres augmente, plus la résistance au cisaillement s'accroît significativement. Malidarreh et al. (2017) ont effectué des essais triaxiaux drainés avec trois types de fibres, constatant que leur ajout augmente la résistance au cisaillement drainé du sable étudié. Sujatha et al. (2018) ont observé une nette amélioration du comportement ductile d'un sol renforcé avec deux types de fibres de verre. Sujatha et al. (2020) ont analysé les propriétés mécaniques d'une argile renforcée avec 0 à 1% de deux types de fibres de verre (AR et E). Ils ont mis en évidence un impact significatif sur la résistance à la compression non confinée, atteignant 179 kPa (fibres AR) et 137,87 kPa (fibres E) pour 0,75% de fibres contre 71 kPa pour l'argile non renforcée. L'ajout de fibres favorise aussi le comportement dilatat. Missoum et al. (2021) ont examiné via des essais de cisaillement direct l'effet de la rupture des fibres (sisal, polypropylène, verre) à différents dosages sur un sable. Ils ont montré que l'ajout de fibres améliore remarquablement la résistance au cisaillement, les fibres de sisal donnant de meilleurs résultats que le verre ou le polypropylène. Elakeb et Elhabchi (2023) ont évalué l'impact de fibres de doum sur la résistance au cisaillement des mélanges sable de Chlef-fibres de doum. Elles ont trouvé que la teneur en fibres de doum a une influence significative sur le comportement mécanique des mélanges sable de Chlef-fibre de doum pour les deux densités relatives initiales ($D_r=50\%$ et 90%) ; ou la résistance au cisaillement augmentait avec l'augmentation de teneur en fibres de doum jusqu'à une teneur au seuil de ($F_d = 0.4\%$). Bien que de nombreuses études aient porté sur le renforcement des sols sableux par différentes fibres, peu se sont concentrées sur les fibres naturelles comme celles de doum et leur réponse mécanique contrainte-déformation.

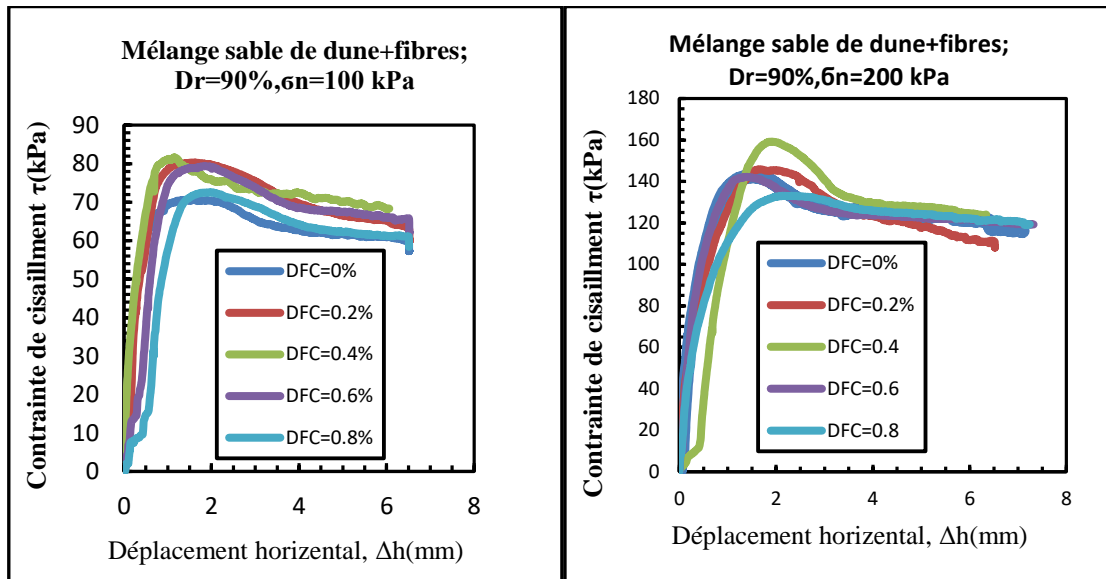
Dans ce cadre, une série d'essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande a été réalisée pour analyser l'impact de l'ajout de fibres de doum sur le comportement mécanique de deux sables (dune et concassé). Tous les mélanges sable (dune et concassé) -fibres de doum ont été reconstitués au laboratoire par la méthode de la déposition sec pour une densité relative ($D_r=90\%$) et soumis à trois contraintes normales initiales (100, 200 et 400 kPa). Les essais de cisaillement direct ont été effectués sur les sables (dune et concassé) mélanges avec

des teneurs en fibres de doum variant de 0 à 0.8% par paliers de 0,2%. Cette étude vise ainsi à combler un manque dans la recherche sur le renforcement par des fibres naturelles en caractérisant en détail l'effet des fibres de doum sur la réponse mécanique deux sables ayant différentes formes (dune et concassé).

3.2. Résultats des essais réalisés

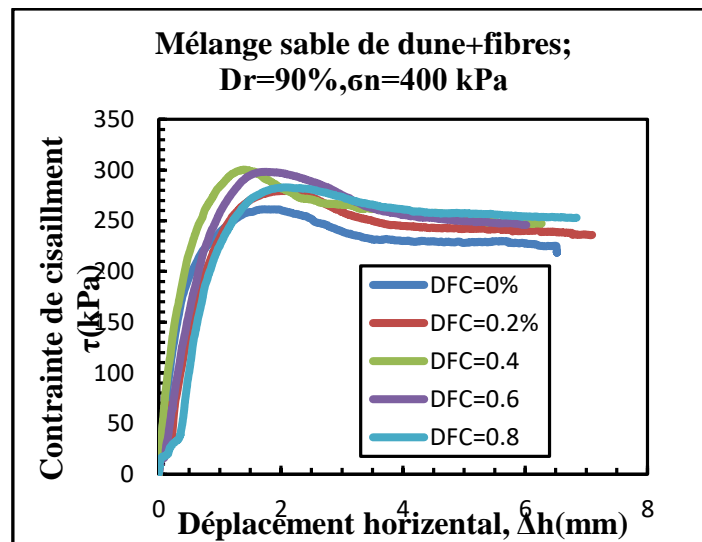
3.2.1. Mélange sable de dune-fibres de doum

Dans le but d'étudier l'influence de la teneur en fibres de doum sur la résistance au cisaillement du sable de dune, la Figure 3.1 présente les résultats des essais obtenus à partir de cette étude. Différentes teneurs en fibres de doum ont été testées : $DF_c = 0\%$, $0,2\%$, $0,4\%$, $0,6\%$ et $0,8\%$. Les échantillons de mélanges sable de dune-fibres de doum ont été reconstitués au laboratoire par la méthode de la déposition sec à une densité relative initiale $Dr = 90\%$. Ils ont ensuite été soumis à trois contraintes normales initiales $\sigma_n = 100$ kPa, 200 kPa et 400 kPa. Les résultats obtenus mettent clairement en évidence l'influence significative de l'ajout des fibres de doum sur le comportement mécanique en cisaillement des mélanges sable de dune-fibres de doum, et ce pour les trois niveaux de contraintes normales appliquées. On constate que l'ajout de fibres jusqu'à une teneur seuil de $DF_c = 0,4\%$ engendre une augmentation progressive de la résistance au cisaillement. Plus précisément, par rapport au sable pur non renforcé ($Fd = 0\%$), les échantillons avec $DF_c = 0,4\%$ présentent des gains de résistance au cisaillement de $15,71\%$, $11,69\%$ et $14,94\%$ pour $\sigma_n = 100$ kPa, 200 kPa et 400 kPa respectivement. Cependant, au-delà de cette teneur seuil en fibres de $0,4\%$, un comportement inverse est observé avec une diminution de la résistance au cisaillement. En comparaison aux échantillons optimaux à $DF_c = 0,4\%$, les mélanges avec $DF_c = 0,6\%$ voient leur résistance au cisaillement chuter de $11,11\%$, $16,35\%$ et $6,00\%$ pour les contraintes $\sigma_n = 100$, 200 et 400 kPa respectivement. Les résultats trouvés sont similaires avec les observations d'Elakeb et Elhabchi (2023).



(a)

(b)



(c)

Figure 3.1 : Comportement mécanique des mélanges sable de dune-fibres de doum ;($Dr = 90\%$)

(a)- $\sigma_n=100$ kPa, (b)- $\sigma_n= 200$ kPa et $\sigma_n =400$ kPa ;

3.2.2. Mélange sable concassé-fibres

Une série d'essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande a été réalisée afin d'étudier l'impact de la teneur en fibres de doum sur la résistance au cisaillement du sable concassé. La Figure 3.2 présente les résultats obtenus. Les échantillons de mélanges sable concassé-fibres de doum ont été reconstitués au laboratoire par dépôt sec avec différentes teneurs en fibres allant de $DF_c = 0\%$ à $0,8\%$ par incréments de $0,2\%$. Une densité relative initiale $Dr=90\%$ a été utilisée et les échantillons ont été soumis à trois contraintes normales

initiales σ_n de 100, 200 et 400 kPa. Les résultats indiquent que l'augmentation de la teneur en fibres de doum influence remarquablement la résistance au cisaillement pour les trois contraintes normales étudiées. De plus, d'après la figure (3.2), l'incrément de la teneur en fibre de doum induit généralement une augmentation de la résistance au cisaillement jusqu'à une teneur en fibres de doum limite de ($DF_c = 0.4\%$) ; ($\tau_{pic} = 126.33$ kPa pour $DF_c = 0\%$, $\tau_{pic} = 134.55$ kPa pour $DF_c = 0.2\%$ et $\tau_{pic} = 136.97$ kPa pour $DF_c = 0.4\%$, considérant la contrainte normale initiale (100 kPa). Au-delà de cette teneur en fibres, la tendance inverse a été observée ($DF_c > 0.4\%$), ou l'augmentation du pourcentage de fibres de doum induit une diminution de résistance au cisaillement pour tous les paramètres testés ($\tau_{pic} = 130.86$ kPa pour $DF_c = 0.6\%$, $\tau_{pic} = 127.5$ kPa pour $DF_c = 0.8\%$ pour la contrainte normale initiale (100 kPa). De plus, pour les deux contraintes normales initiales (200 et 400 kPa) ; on remarque que la résistance au cisaillement augmente progressivement avec l'augmentation de teneur en fibres de doum jusqu'à un seuil de 0.6% de fibre de doum ; ($\tau_{pic} = 234.11$ kPa pour $DF_c = 0\%$, $\tau_{pic} = 241.97$ kPa pour $DF_c = 0.2\%$ et $\tau_{pic} = 243.41$ kPa pour $DF_c = 0.4\%$, et $\tau_{pic} = 246.08$ kPa pour $DF_c = 0.6\%$, considérant la contrainte normale initiale (200 kPa) et ($\tau_{pic} = 430.91$ kPa pour $F_d = 0\%$, $\tau_{pic} = 431.25$ kPa pour $DF_c = 0.2\%$, $\tau_{pic} = 440.66$ kPa pour $DF_c = 0.4\%$ et $\tau_{pic} = 446.5$ kPa pour $DF_c = 0.6\%$, considérant la contrainte normale initiale (400 kPa). Au-delà de cette teneur en fibres, la tendance inverse a été observée ($DF_c > 0.6\%$), ou l'augmentation du pourcentage de fibres de doum induit une diminution de résistance au cisaillement pour tous les paramètres testés. ($\tau_{pic} = 242.86$ kPa pour $DF_c = 0.8\%$ pour la contrainte normale initiale (200 kPa) et ($\tau_{pic} = 420.88$ kPa pour $DF_c = 0.8\%$ pour la contrainte normale initiale (400 kPa). Ce phénomène peut s'expliquer par la création de macropores dans la matrice sableuse lorsque la teneur en fibres excède les seuils identifiés. Ces macropores, facilement compressibles sous cisaillement, augmentent l'indice des vides et réduisent les contacts intergranulaires, diminuant ainsi la résistance par frottement interne.

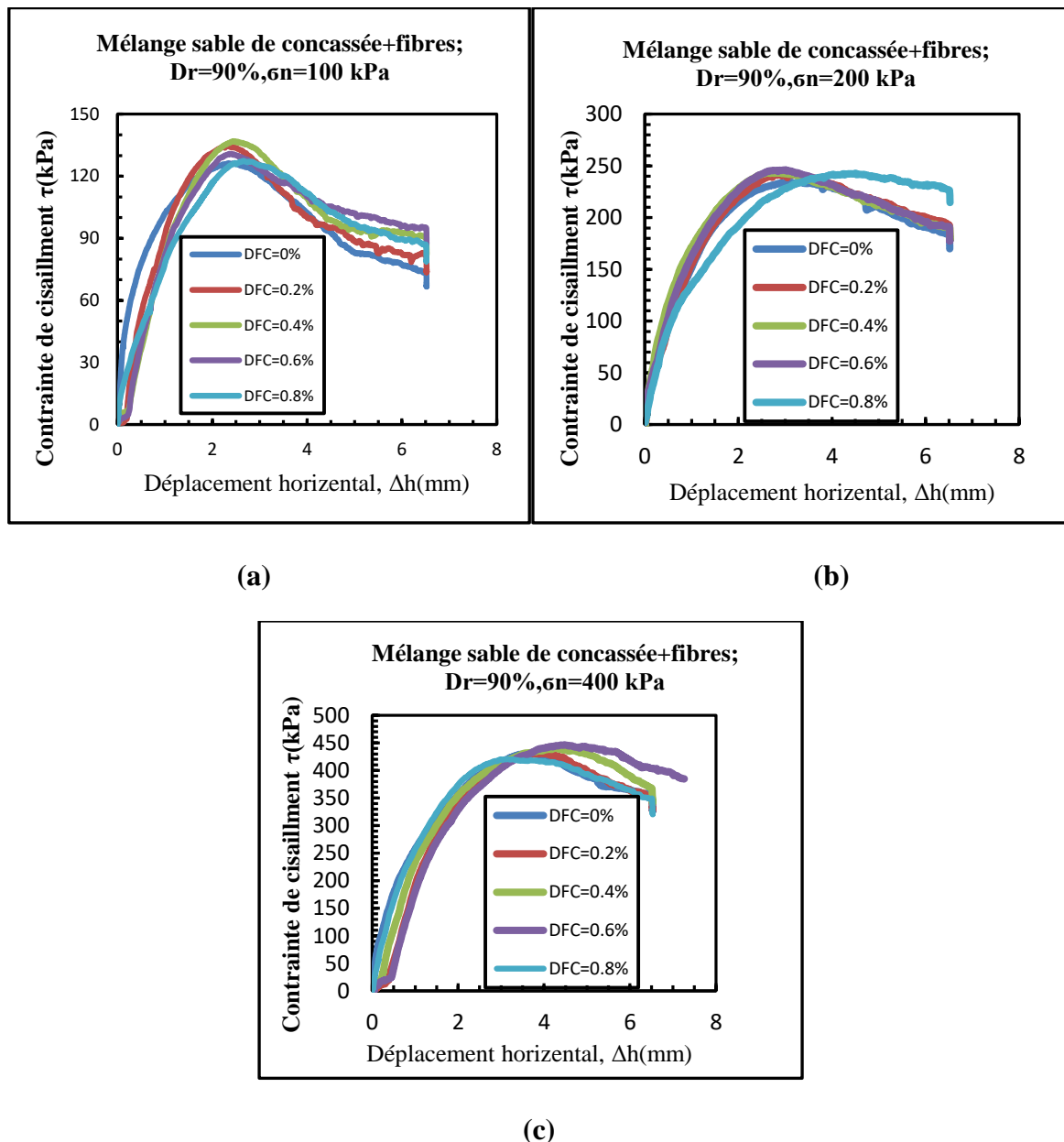


Figure 3.2 : Comportement mécanique des mélanges sable de dune-fibres de doum ;($D_r = 90\%$)

(a)- $\sigma_n = 100$ kPa, (b)- $\sigma_n = 200$ kPa et $\sigma_n = 400$ kPa ;

3.3. Influence de la teneur de fibres de doum sur la résistance au cisaillement maximale

Les Figures 3.3 et 3.4 reproduisent les résultats des Figures 3.1 et 3.2 afin d'évaluer l'influence de la teneur en fibres de doum (DF_c variant de 0% à 0,8%) sur la résistance au cisaillement maximale des mélanges de deux sables (dune et concassé) avec ces fibres. Les échantillons ont été préparés à une densité relative initiale $D_r = 90\%$ (état dense) et soumis à trois contraintes normales σ_n de 100, 200 et 400 kPa. A partir de l'histogramme illustré sur la Figure 3.3, on remarque que la teneur en fibre de doum est un paramètre pertinent dans le but d'améliorer la résistance au cisaillement des sols sableux. En outre, la résistance au cisaillement

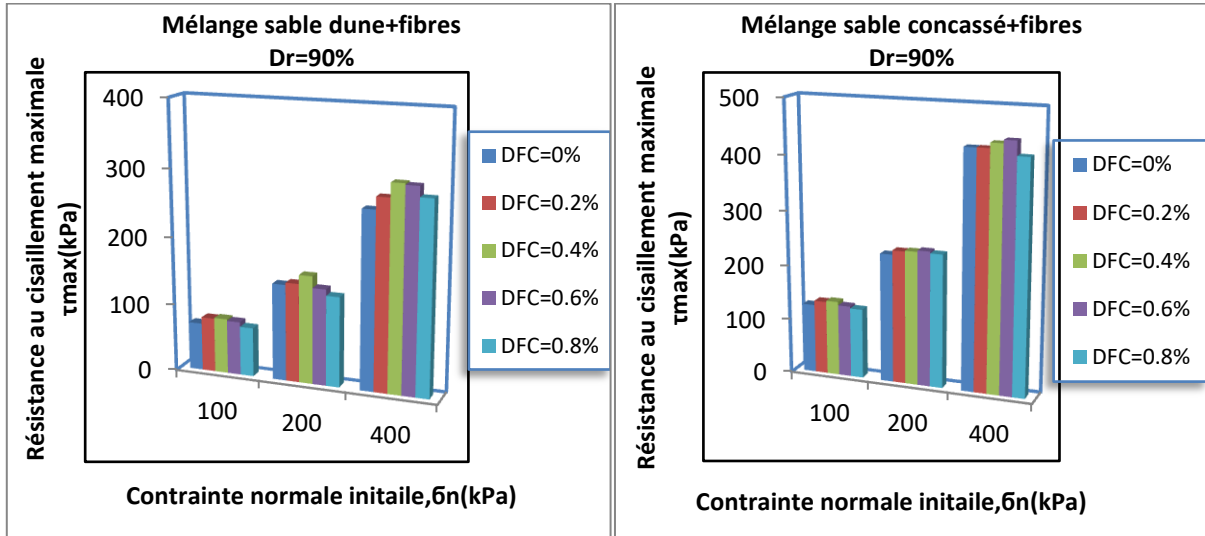
maximale augmente avec l'augmentation de la teneur en fibre de doum jusqu'à une fraction limite de fibre de $DF_c = 0.4\%$ pour les trois contraintes normales initiales considérées ($\sigma_n = 100, 200$ et 400 kPa) considérant les mélanges sable de dune-fibres de doum. Une observation similaire est faite pour le mélange sable concassé-fibres à une contrainte normale initiale ($\sigma_n = 100$ kPa), avec une augmentation de la résistance au cisaillement maximale jusqu'à $DF_c = 0.4\%$. Par contre, elle augmente avec l'augmentation de la fraction de fibres de doum jusqu'à un seuil de $DF_c = 0.6\%$ pour le mélange sable concassé-fibre de doum considérant les deux autres contraintes normales initiales (200 kPa et 400 kPa) respectivement. Au-delà de ces seuils, l'augmentation de la fraction de fibres de doum induit une réduction de la résistance au cisaillement pour les trois contraintes normales initiales étudiées. Lorsque la contrainte normale initiale augmente, le potentiel d'amélioration de la résistance au cisaillement augmente avec la croissance de la teneur en fibre de doum pour tous les paramètres considérés. De plus, une relation polynomiale est suggérée pour exprimer la résistance au cisaillement maximale en fonction de l'évolution de la teneur en fibres de doum pour le mélange sable de dune-fibres de doum et le mélange sable concassé-fibres de doum compte tenu les trois contraintes normales initiales ($100, 200$ et 400 kPa) (Figure 3.4).

$$(\tau_{\max}) = A \times (DF_c)^2 + B \times (DF_c) + C \quad (3.1)$$

Le tableau 3.1 illustre les coefficients A, B, C et le coefficient de corrélation correspondant (R^2) pour les matériaux sélectionnés à l'étude

Tableau 3.1: Coefficient A, B, C et R^2 pour l'équation (3.1)

Mélanges	σ_n (kPa)	A	B	C	R^2
Sable dune-fibres de doum	100	-65.228	53.613	71.11	0.97
	200	-98.71	67.69	141.19	0.75
	400	-160.81	159.57	259.57	0.96
Sable concassé-fibres de doum	100	-56.597	44.597	126.99	0.88
	200	-37.401	40.726	234.37	0.96
	400	-99.058	76.843	427.08	0.57



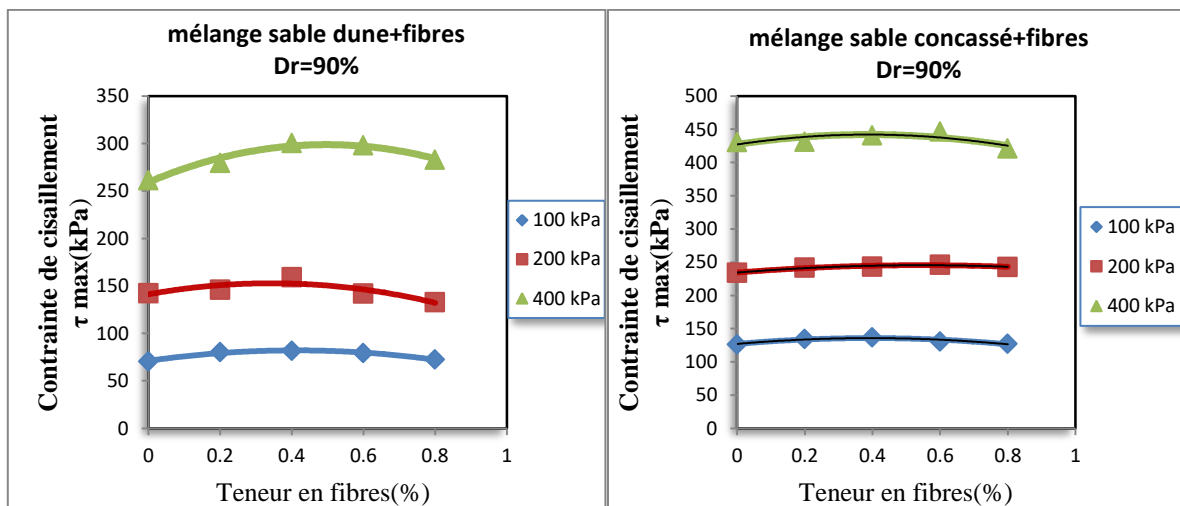
(a)

(b)

Figure 3.3 : Résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte normale initiale

(a)-Mélange sable dune-fibres

(b)-Mélange sable concassé-fibres



(a)

(b)

Figure 3.4: Effet de la teneur en fibres de doum et la contrainte normale sur la résistance au cisaillement maximale

a)-Mélange sable dune-fibres de doum

(b)-Mélange sable concassé-fibres de doum

3.4. Influence de la teneur en fibres de doum sur la résistance au cisaillement normalisée

La Figure 3.5 illustre l'effet de la teneur en fibres de doum sur la variation de la résistance au cisaillement maximale normalisée (τ_{max}/σ_n) de deux mélanges sable de dune-fibres de doum et sable concassé-fibres de doum dont des fractions sont comprises entre $DF_c=0\%$ et 0.8% avec un intervalle de 0.2% . Les mélanges ont été reconstitués avec une densité relative initiale ($D_r=90\%$). A partir de cette figure, on observe que la résistance au cisaillement maximale

normalisée augmente avec l'augmentation de la teneur en fibre de doum jusqu'à un seuil de $DF_c=0.4\%$ pour le mélange sable de dune-fibres de doum et de $DF_c=0.6\%$ pour le mélange sable concassé-fibres de doum considérant la densité relative ($D_r=90\%$). Par contre, la tendance inverse a été observée lorsque la teneur en fibres de doum devenait supérieure aux ces seuils pour tous les paramètres sélectionnés. De plus, une relation polynomiale peut exprimer la corrélation entre la résistance au cisaillement maximale normalisée et la teneur en fibres de doum pour les matériaux testés (sable de dune et concassé). En outre, il est clairement observé que la résistance au cisaillement normalisée des mélanges sable concassé-fibres de doum est très prononcée par rapport aux mélanges sable de dune-fibres de doum. Cela expliquer par le fait que la morphologie plus anguleuse et rugueuse du sable concassé, combinée à une compacité et adhérence fibres-grains supérieures, permet d'exploiter de manière plus efficace le potentiel de renforcement offert par les fibres de doum, se traduisant par des gains de résistance au cisaillement normalisée plus importants.

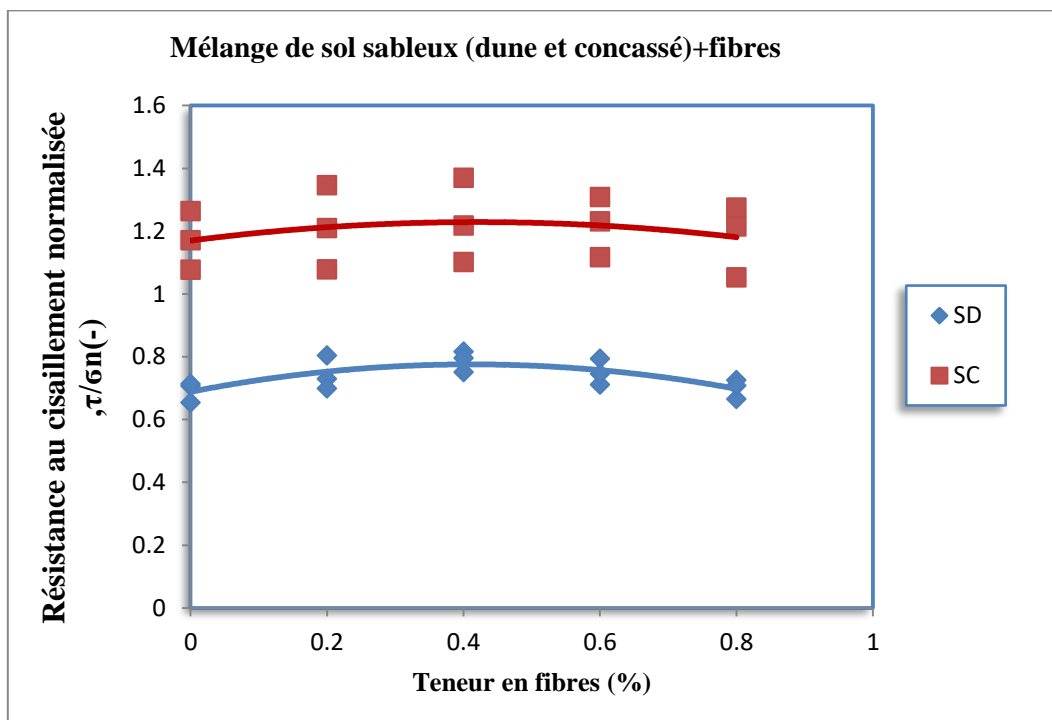


Figure 3.5 : Impact de la teneur en fibres de doum sur résistance au cisaillement normalisée (τ/σ_n) des mélanges étudiés.

3.5. Influence de la teneur en fibres de doum sur l'angle de frottement

Dans le but d'évaluer l'impact de la fraction de fibres de doum sur l'angle de frottement interne de deux sables (dune et concassé). Les échantillons ont été mélangés avec des fibres de doum allant de 0% à 0.8% pour les trois contraintes normales ($\sigma_n=100, 200$ et 400 kPa), avec des incréments de 0,2%. Les mélanges du sable (dune et concassé) -fibre de doum ont été préparés a une densité relative initiale ($D_r= 90\%$). On observe que l'augmentation de la teneur en fibres de doum entraîne une augmentation de l'angle de frottement jusqu'à un seuil de 0.4% de fibres pour le mélange sable de dune-fibres de doum et 0.6% de fibres pour le mélange sable concassé-fibres de doum considérant les paramètres étudiés. Cependant, au-delà de ces seuils, une tendance inverse a été constatée pour tous les paramètres testés. Par exemple, une fraction de 0.8% de fibres de doum a entraîné une diminution notable de l'angle de frottement par rapport à des échantillons contenant 0.4% et 0.6% de fibres de doum, pour les deux mélanges étudiés. En outre, il existe des très bonnes corrélations entre l'angle de frottement et la teneur en fibres de doum, avec un coefficient de détermination ($R^2=0.95$) pour le mélange sable de dune-fibres de doum et ($R^2=0.79$) pour le mélange sable concassé-fibres de doum, en tenant compte tous les paramètres examinés, l'équation suivante est proposée pour exprimer l'évolution de l'angle de frottement (ϕ) en fonction de la teneur en fibres de doum (DFc).

$$(\phi) = A \times (DFc)^2 + B \times (DFc) + C \quad (3.2)$$

Le tableau 3.2 illustre les coefficients A, B, C et coefficient de détermination (R^2) pour les matériaux testés.

Tableau 3.2 : Coefficients A, B, C et R^2 pour équation (3.2)

Mélanges	A	B	C	R^2
Sable dune-fibres de doum	-12.89	14.84	31.85	0.95
Sable concassé-fibres de doum	-10.89	8.72	44.29	0.79

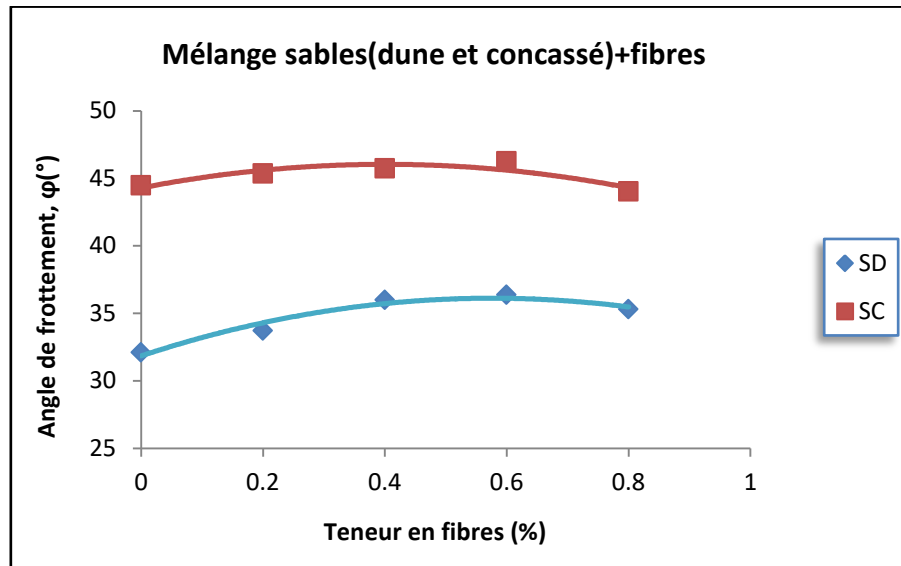


Figure 3.6 : Angle de frottement en fonction de teneur en fibres de doum pour les matériaux étudiés.

3.6. Mélanges sables-fibres de doum traités

La Figure 3.7 présente les résultats des essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande réalisés dans le but d'analyser l'effet de la teneur en fibres de doum traitées sur le comportement mécanique des mélanges sable (dune et concassé) -fibres de doum traités. Le traitement appliqué aux fibres de doum consistait à les tremper dans une solution contenant environ 3% d'hydroxyde de sodium (NaOH) pendant 30 minutes à température ambiante. Les échantillons du sable ont été renforcés avec des fibres de doum traités selon une teneur en fibres allant de 0% à 0.8% avec un pas de 0.2%. Les différents mélanges ont été préparés au laboratoire avec la méthode de déposition sec à une densité relative initiale ($D_r = 90\%$) sous une contrainte normale initiale de 200 kPa. A partir de cette figure, on remarque que la résistance au cisaillement augmente progressivement avec l'augmentation de teneur en fibres de doum jusqu'à un seuil de $DF_{c_i} = 0.4\%$ de fibre de doum traité pour la densité relative initiale et la contrainte normale initiale sélectionnées. Les échantillons du mélange sable (dune et concassé) -fibre de doum traité avec de $DF_{c_i} = 0.4\%$ indiquent une augmentation très significative de la résistance au cisaillement, en comparaison aux échantillons du sable propre (dune et concassé) non renforcé, ($DF_{c_i} = 0\%$). Alors que, la tendance inverse a été remarquée après de ce seuil (la teneur en fibre de doum de $F_d > 0.4\%$ montrent une diminution de la résistance au cisaillement).

De plus, comme on peut le voir sur la Figure (3.8), les résultats obtenus indiquent que l'impact de la teneur en fibres de doum traités est très remarquable sur la résistance au

cisaillement maximale du mélange sable concassé-fibres de doum traités par rapport aux mélanges sable de dune-fibres de doum traités. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que la forme anguleuse des grains de sable concassé peut favoriser une meilleure dispersion et orientation aléatoire des fibres de doum traités au sein de la matrice par rapport aux grains plus sphériques du sable de dune. Une dispersion homogène des fibres optimise leur renfort dans toutes les directions.

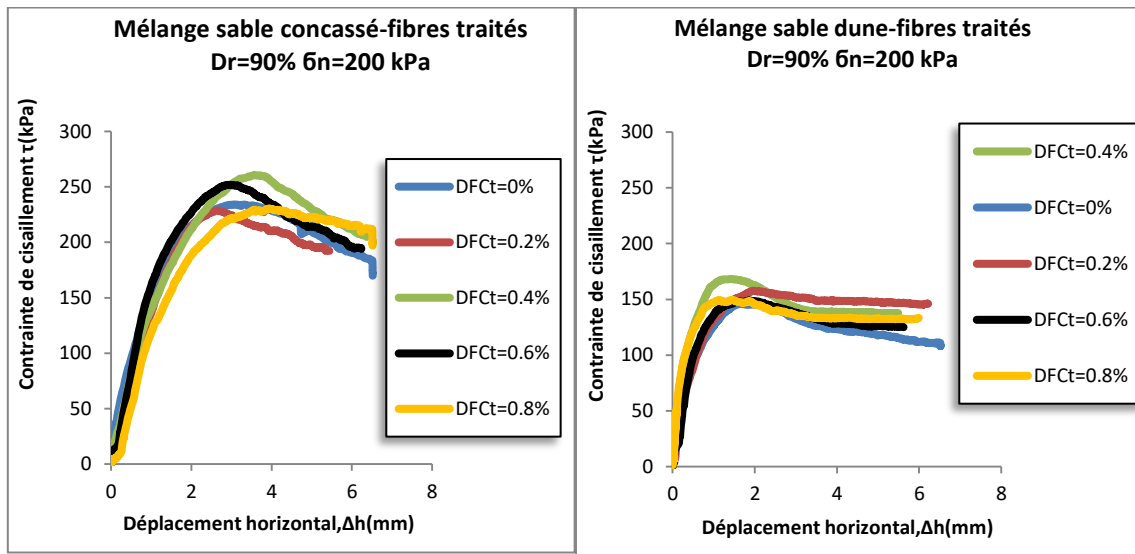


Figure 3.7 : Comportement mécanique des mélanges sable (dune et concassé)-fibres de doum traités.

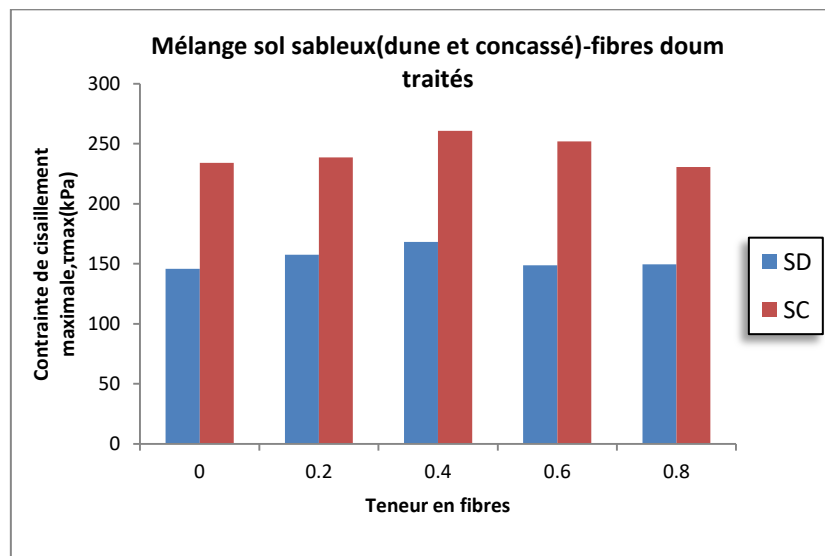


Figure 3.8 : Résistance au cisaillement maximale en fonction de teneur en fibres de doum traité des mélanges étudiés.

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, l'influence de la teneur en fibres de doum sur le comportement mécanique d'échantillons du sable de dune et du sable concassé a été étudiée. Les échantillons ont été reconstitués par la technique de déposition sec pour obtenir une densité relative initiale de 90%. Ils ont ensuite été soumis à des essais de cisaillement direct sous trois niveaux de contraintes normales initiales différents : 100, 200 et 400 kPa. Des teneurs en fibres de doum allant de 0% à 0,8%, avec un incrément de 0,2%, ont été incorporées aux échantillons sableux pour chacune des trois contraintes normales appliquées.

Les résultats des essais menés sur divers mélanges montrent que l'incorporation de fibres de doum a un impact significatif sur le comportement mécanique des sols sableux (sable de dune et sable concassé), notamment en ce qui concerne la résistance maximale au cisaillement, la résistance maximale au cisaillement normalisée et l'angle de frottement. Ces résultats mettent en évidence le rôle crucial des fibres de doum dans le renforcement et l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols sableux. De plus, la résistance maximale au cisaillement augmente avec la proportion de fibres de doum, atteignant un seuil de $DFc=0,4$ % pour le sable de dune et un seuil de $DFc=0,6$ % pour le sable concassé. Au-delà de ces seuils, une tendance inverse a été observée pour tous les échantillons.

Selon les résultats trouvés, il est évident que l'augmentation de la fraction de fibres de doum entraîne généralement une augmentation de l'angle de frottement, atteignant un point limite de $DFc=0,4$ % pour le mélange sable de dune-fibres de doum et de $DFc=0,6$ % pour le mélange sable concassé-fibres de doum, en tenant compte de tous les paramètres sélectionnés. Cependant, au-delà de ce seuil de fibres, une tendance inverse a été observée. De plus, il est possible d'établir une corrélation entre l'angle de frottement et la teneur en fibres de doum en utilisant une relation polynomiale qui prend en compte tous les paramètres testés.

Les résultats obtenus montrent qu'une augmentation progressive de la résistance au cisaillement avec l'augmentation de la teneur en fibres de doum jusqu'à un seuil de 0,4 % de fibres de doum traitées. De plus, il est clairement souligné l'impact notable de la teneur en fibres de doum traitées sur la résistance au cisaillement maximale du mélange de sable concassé-fibres de doum traitées par rapport aux mélanges de sable de dune-fibres de doum traitées.

CHAPITRE 4

**EFFET DE DIVERS PARAMETRES SUR
LA REPONSE MECANIQUE DES SOLS
SABLEUX (DUNE ET CONCASSE) -
FIBRES DE DOUM**

4.1. Introduction

De nombreux chercheurs ont mené des expériences en laboratoire pour examiner comment différents facteurs influent sur la réaction mécanique des sols granulaires. Leurs études ont révélé que des éléments tels que, la contrainte normale initiale ou la pression de confinement initiale, ainsi que la forme des particules ont un impact significatif sur le comportement mécanique de ces sols granulaires. La contrainte normale joue un rôle crucial dans la prédiction du comportement mécanique des sols sableux. Selon Azaiez et al. (2020) et Taibi et al. (2023), ils ont été observés que la contrainte normale a une influence significative sur la résistance au cisaillement des sols étudiés. En effet, augmenter la contrainte normale initiale entraîne une augmentation significative de la résistance au cisaillement des mélanges sable de Chlef-cendres volantes. Megrouse et Maameri (2021) ont étudié l'effet de la contrainte normale initiale sur la caractérisation mécanique des mélanges sable de Chlef-biochar et ont constaté que ce paramètre a un effet notable sur leur réponse mécanique. D'autre part, la forme des particules joue un rôle fondamental dans la caractérisation mécanique des sols granulaires. Yang et Wei (2012) ont mené une série d'essais triaxiaux non drainés sur quatre mélanges binaires en ajoutant différentes proportions de deux fines non plastiques présentant des formes de particules différentes : de la silice concassée angulaire et des billes de verre arrondies, à deux sables de quartz propres (Toyoura et Fujian). Leurs résultats ont révélé que l'incorporation de fines arrondies aux sables de quartz entraînait une diminution significative de l'angle de frottement à l'état critique. En revanche, l'ajout de fines angulaires provoquait une légère augmentation de la fraction de l'angle de frottement à l'état critique. Yang et Luo (2015) ont réalisé des essais triaxiaux sur du sable de Fujian mélangé à différentes proportions de fines dans le but d'étudier l'impact des caractéristiques de forme des grains sur le comportement mécanique des mélanges binaires. Leurs résultats ont souligné une corrélation étroite entre les paramètres de forme des particules et le rapport de l'état critique des mélanges examinés. Cherif Taiba et al. (2018) ont mis en lumière l'importance des caractéristiques de forme des grains, notamment en termes de sphéricité et l'angularité, dans le comportement non drainé des mélanges sable-limon. Ils ont constaté une diminution de la résistance au cisaillement non drainé des mélanges sable-limon avec la diminution de la sphéricité combinée et l'augmentation de l'angularité combinée du mélange sable-limon.

Ce chapitre présente une étude visant à évaluer l'effet de différents paramètres sur la réponse mécanique des mélanges de sol sableux, composés de sable de dune et de sable

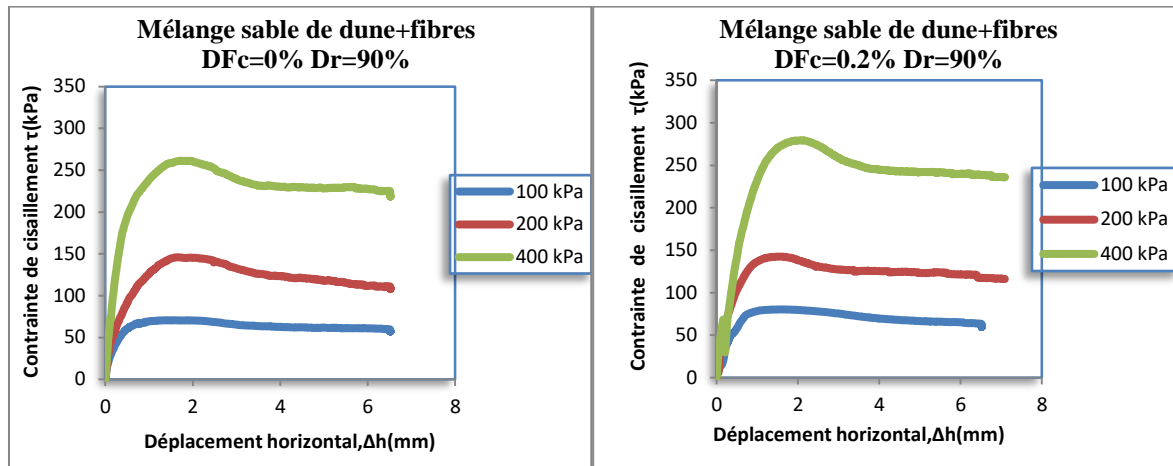
concassé, avec l'addition de fibres de doum. Dans un premier temps, nous examinons l'impact de la contrainte normale initiale sur la résistance au cisaillement de ces divers mélanges. Ensuite, nous décrivons une série d'essais de cisaillement direct qui vise à analyser l'influence de la forme des particules sur le comportement de ces mélanges de sol sableux, avec différentes proportions de fibres de doum.

4.2. Résultats des essais réalisés

4.2.1 Influence de la contrainte normale initiale sur la réponse mécanique des mélanges de sols sableux-fibre de doum

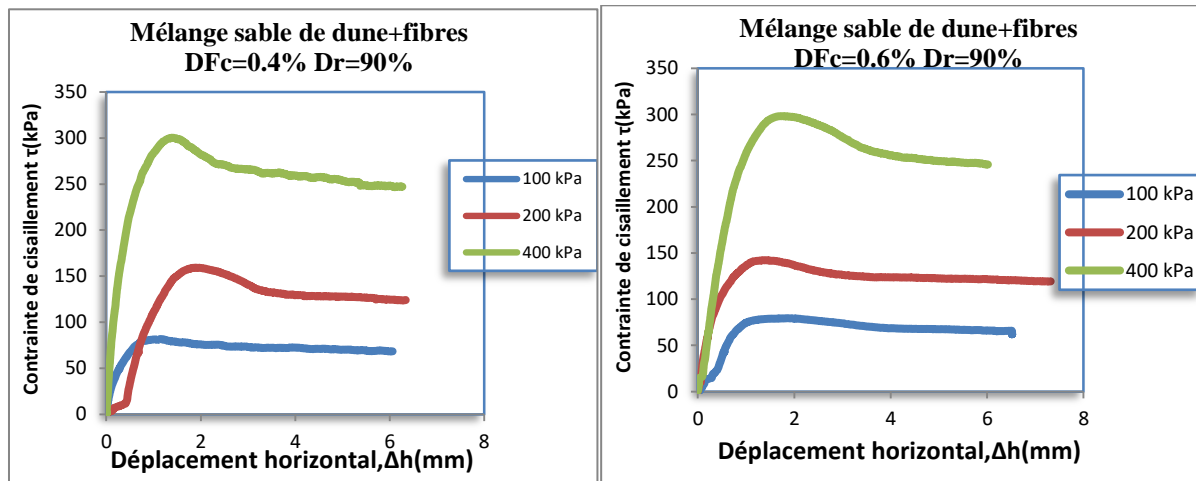
4.2.1.1-Mélange sable de dune-fibres de doum

Dans la Figure (4.1), l'effet spécifique de la contrainte normale initiale sur la réponse mécanique des mélanges de sable de dune et de fibres de doum ($DF_c=0, 0.2, 0.4, 0.6$ et 0.8%) est démontré. Les échantillons ont été préparés en laboratoire en utilisant la technique de déposition sec, garantissant une densité relative initiale dense de 90%. Les résultats des essais effectués dans le cadre de cette étude révèlent que la contrainte normale initiale exerce une influence considérable sur le comportement mécanique de ces mélanges, quel que soit le pourcentage de fibres de doum testé. De manière plus détaillée, il est observé que la résistance au cisaillement augmente progressivement à mesure que la contrainte normale initiale est élevée. Par exemple, pour les différents teneurs en fibres de doum (0, 0.2, 0.4, 0.6 et 0.8%), on constate une augmentation respective de la résistance au cisaillement de 172%, 146%, 168%, 145%, 154% et 155% pour les échantillons soumis à une contrainte normale initiale élevée de 400 kPa par rapport à ceux soumis à une contrainte normale initiale faible de 100 kPa. Ces résultats fournissent des données précises sur la manière dont la contrainte normale initiale influe sur la réponse mécanique des mélanges de sable et de fibres de doum, et ils correspondent étroitement aux conclusions des recherches menées par Elakeb et Elhabchi (2023), offrant ainsi une validation supplémentaire à leurs conclusions antérieures.



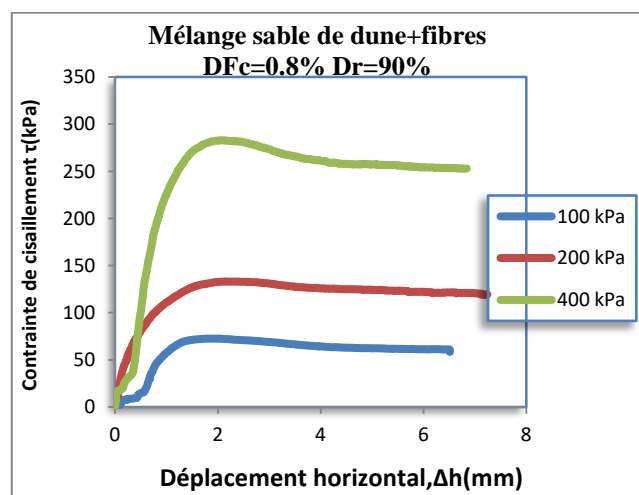
(a)

(b)



(c)

(d)

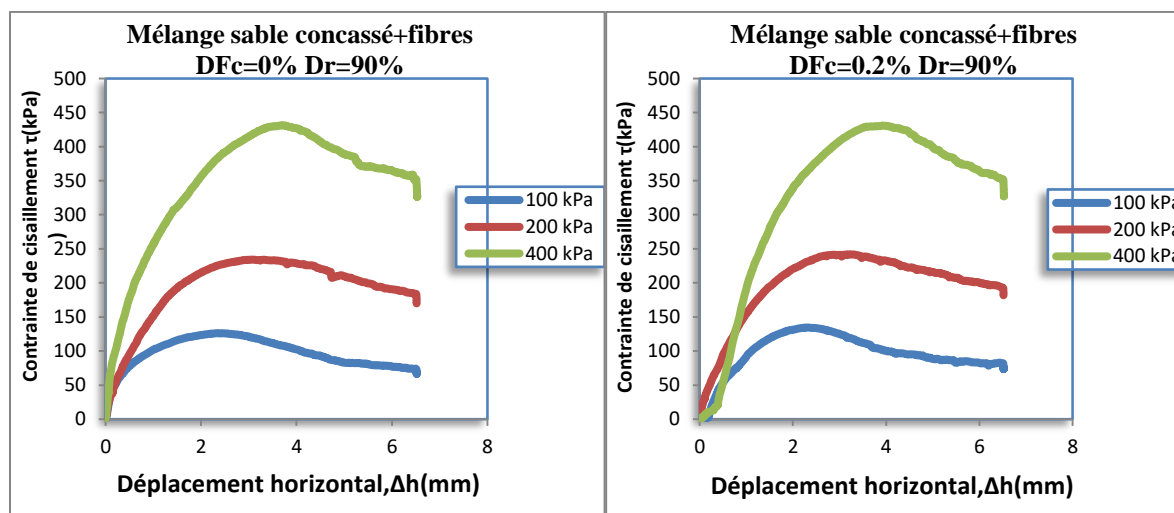


(e)

Figure 4.1: Effet de la contrainte normale sur le comportement mécanique du mélange sable dune-fibres (a)-DFC=0% , (b)-DFC=0.2% , (c)-DFC=0.4% , (d)-DFC=0.6% , (e)-DFC=0.8%

4.2.1.2 Mélange sable concassé-fibres de doum

La Figure 4.2 présente les résultats des essais effectués dans le cadre de cette étude pour évaluer la réponse mécanique du mélange de sable concassé et de fibres de doum, en tenant compte de l'effet de la contrainte normale initiale ($\sigma_n=100, 200$ et 400 kPa). En laboratoire, les échantillons de ces mélanges ont été reconstitués en utilisant la méthode de préparation de déposition sec à une densité relative initiale dense de 90% . Les teneurs de fibres ont varié de 0% à $0,8\%$, avec un intervalle de $0,2\%$. Les résultats des essais indiquent une augmentation de la résistance au cisaillement avec l'augmentation de la contrainte normale initiale, comme le démontrent les données recueillies. Notamment, les échantillons de 0% , $0,2\%$, $0,4\%$, $0,6\%$ et $0,8\%$ de fibres soumis à une contrainte normale initiale de $\sigma_n=400$ kPa présentent une augmentation de la résistance au cisaillement de 179% , 148% , 156% , 161% , 182% et 239% respectivement, par rapport à ceux soumis à une contrainte normale initiale faible de $\sigma_n=100$ kPa. Par ailleurs, les illustrations de les Figures 4.1 et 4.2 mettent en évidence que l'impact de l'augmentation de la contrainte normale est particulièrement significatif sur la résistance au cisaillement du sable concassé par rapport au sable de dune. Cette observation souligne une différence notable dans la réponse mécanique entre ces deux types de sable en fonction de la contrainte normale initiale. Ces résultats concordent étroitement avec les conclusions des recherches menées par Elakeb et Elhabchi (2023).



(a)

(b)

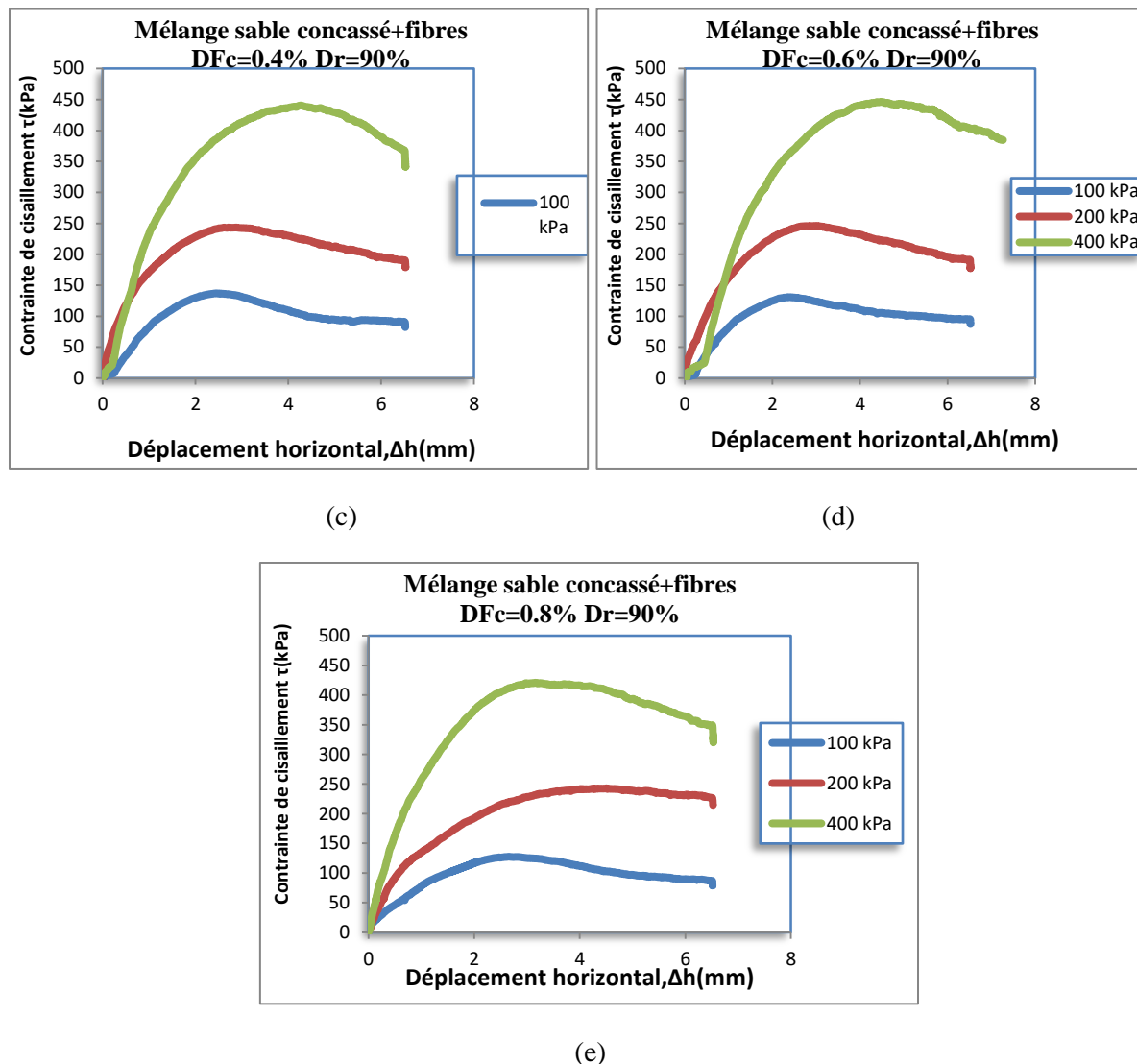


Figure 4.2: Effet de la contrainte normale sur comportement mécanique des mélange sable concassé- fibres

(a)-DFc=0% , (b)-DFc=0.2% , (c)-DFc=0.4% , (d)-DFc=0.6% , (e)-DFc=0.8%

4.2.2 Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique des mélanges sols sableux (dune et concassé) - fibres de doum

4.2.2.1 Contrainte normale initiale faible, $\sigma_n=100$ kPa

Pour analyser l'influence de la forme des particules de deux types de sols sableux (sable de dune, « forme sphérique », et sable concassé, « forme anguleuse ») sur la réponse mécanique des mélanges de sable et de fibres de doum, une série d'essais de cisaillement direct a été menée, dont les résultats sont présentés dans les Figures (4.3-4.7). En laboratoire, les échantillons de ces mélanges ont été reconstitués en utilisant la technique de la pluviation à sec, tout en les soumettant à une contrainte normale initiale faible ($\sigma_n=100$ kPa), en tenant compte des différentes teneurs en fibres de doum (DFc = 0, 0.2, 0.4, 0.6 et 0.8%). Les

résultats des essais mettent en évidence l'impact significatif de la forme des particules sur la résistance au cisaillement, avec des valeurs de résistance maximale (τ_{max}) observées à 70.63 kPa et 126.33 kPa pour $DFc = 0\%$, à 80.33 kPa et 134.55 kPa pour $DFc = 0.2\%$, à 81.61 kPa et 136.97 kPa pour $DFc = 0.4\%$, à 79.36 kPa et 130.86 kPa pour $DFc = 0.6\%$, et à 72.55 kPa et 127.5 kPa pour $DFc = 0.8\%$ (la première valeur est celle du sable de dune et la deuxième est celle du sable concassé), respectivement, comme illustré dans les Figures (4.3a-4.7a). L'effet de la forme des grains sur cette tendance à la résistance au cisaillement est expliqué par l'augmentation de l'enchevêtrement initial des mélanges, favorisant ainsi une dilatation accrue et entraînant une augmentation significative de la résistance au cisaillement avec une structure d'échantillon plus stable. Ceci est également visible dans le plan de déplacement vertical-horizontal, où l'augmentation de la forme et la taille des particules conduit à une augmentation significative de la phase de dilatance pour tous les paramètres testés, comme illustré dans les Figures (4.3b-4.7b).

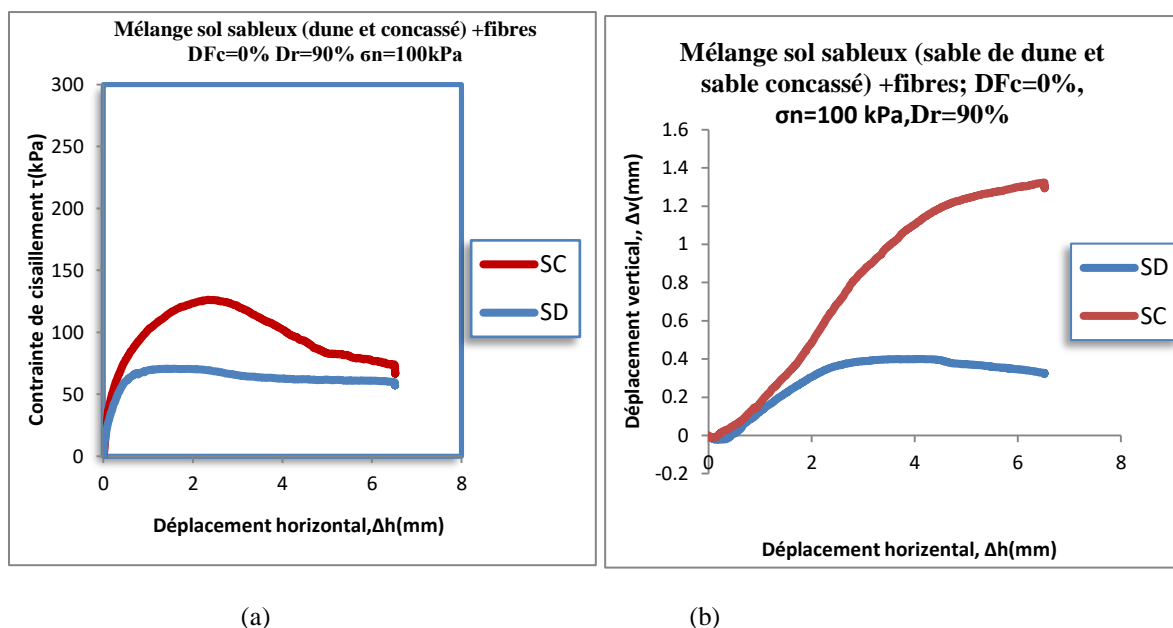
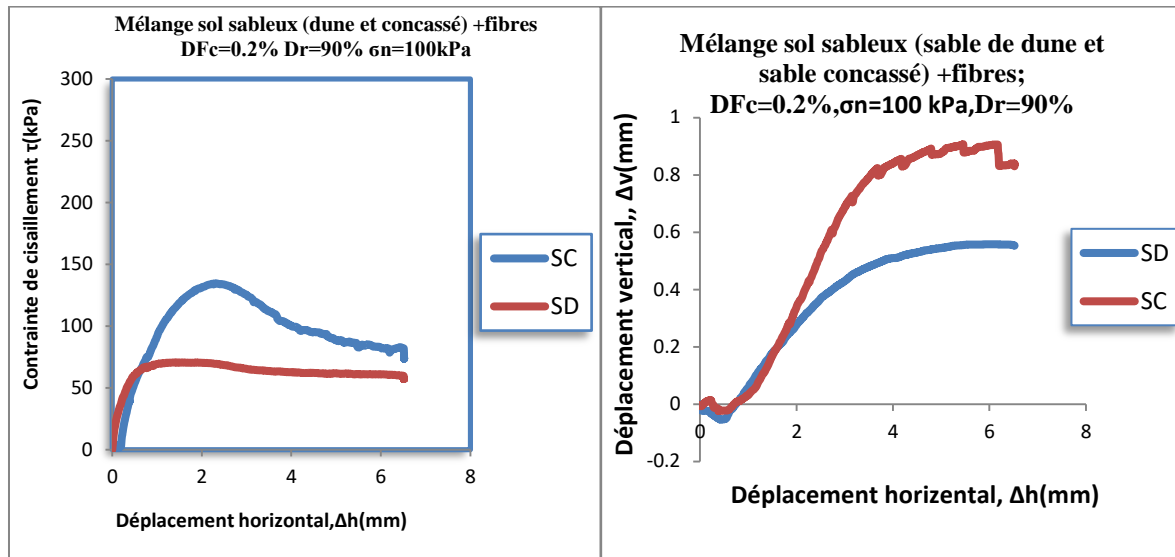


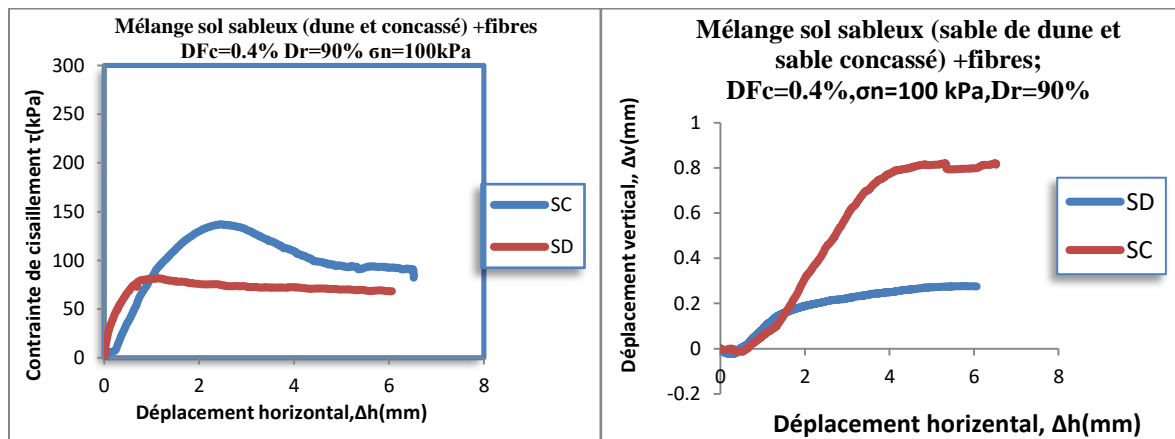
Figure 4.3: Effet la forme des particules sur le comportement mécanique. ($\sigma_n=100$ kPa, $DFc=0\%$)
(a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical



(a)

(b)

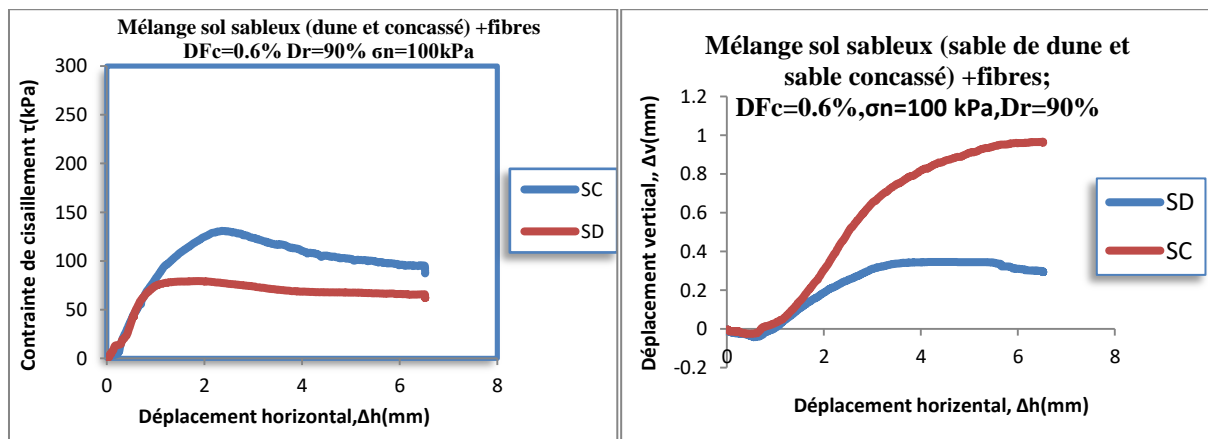
Figure 4.4: Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=100\text{ kPa}$, DFc=0.2%)
(a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical



(a)

(b)

Figure 4.5: Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=100\text{ kPa}$, DFc=0.4%)
(a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical



(a)

(b)

Figure 4.6: Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=100$ kPa, $DFc=0.6\%$)
 (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical

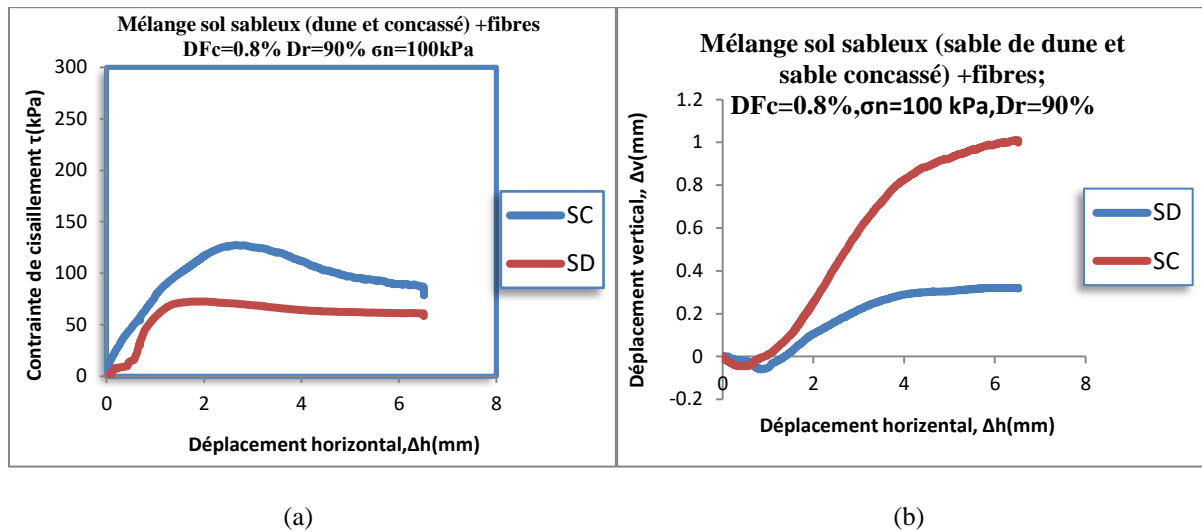


Figure 4.7: Effet la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=100$ kPa, $DFc=0.8\%$)
 (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical

4.2.2.2 Contrainte normale initiale moyenne, $\sigma_n=200$ kPa

Une série d'essais de cisaillement direct a été réalisée pour évaluer l'influence de la forme des particules sur la réponse mécanique des mélanges de sol sableux, composés de sable de dune et de sable concassé, avec différentes fractions de fibres de doum ($DFc=0, 0.2, 0.4, 0.6$ et 0.8%). Les échantillons ont été reconstitués en laboratoire en utilisant la technique de préparation par pluviation à sec (PS) avec une densité relative dense ($Dr=90\%$) et une contrainte initiale normale moyenne de $\sigma_n=200$ kPa. Les résultats de cette étude sont présentés dans les Figures 4.8-4.12. Il est observé que la résistance au cisaillement des échantillons de mélanges de sable concassé et de fibres de doum est supérieure à celle des échantillons de mélange de sable de dune et de fibres de doum, pour toutes les fractions de fibres de doum étudiées, comme indiqué dans les Figures 4.8a-4.12a. L'augmentation de la résistance au cisaillement est significative pour les échantillons reconstitués par pluviation à sec, augmentant respectivement de 25%, 18%, 28%, 20%, 25% et 16% pour les cinq fractions de fibres de doum ($DFc=0, 0.2, 0.4, 0.6$ et 0.8%). Les résultats des essais dans le plan déplacement vertical-horizontal (Figures 4.8b, 4.12b) confirment clairement le rôle de la forme des grains sur la réponse mécanique des mélanges de sable et de fibres de doum. La forme des particules de sable concassé favorise un comportement plus dilatant ou un caractère stable du sable, tandis que cela signifie ici contractance pour les échantillons de sable de dune. De plus, les particules anguleuses du sable concassé ont tendance à s'emboîter les uns dans les

autres, limitant la contractance du matériau lorsqu'il est soumis à des contraintes de cisaillement. Cela conduit à un comportement plus dilatant, où la déformation du matériau est limitée. Par contre, lorsqu'une contrainte de cisaillement est appliquée, le sable de dune a tendance à se déformer plus facilement, ce qui entraîne une réponse mécanique moins stable et moins dilatant.

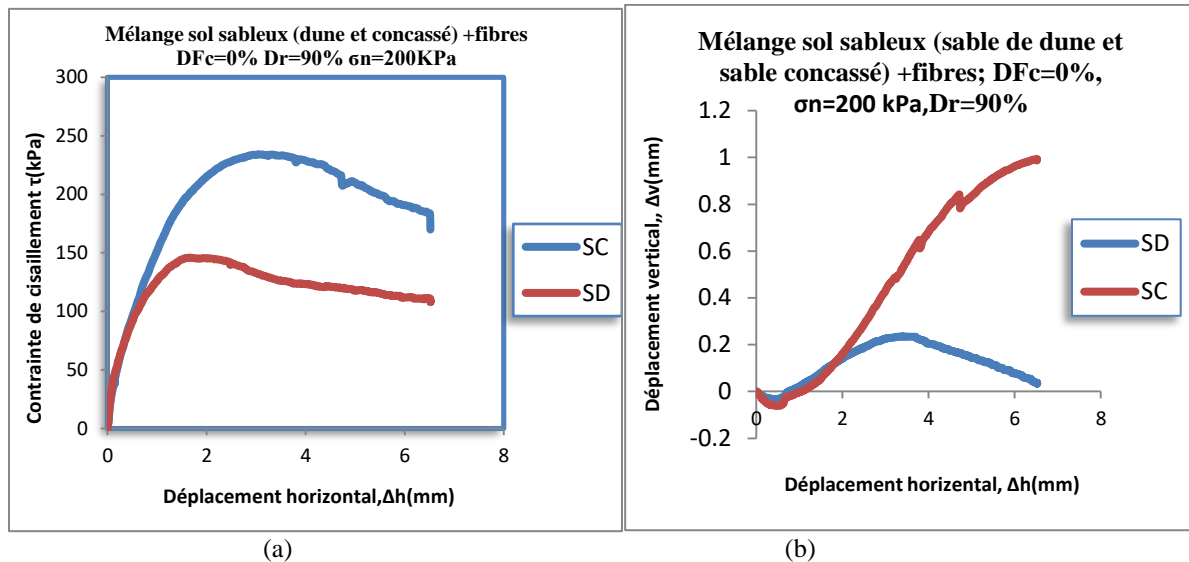


Figure 4.8 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=200\text{ kPa}$, $DF_c=0\%$)
 (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical

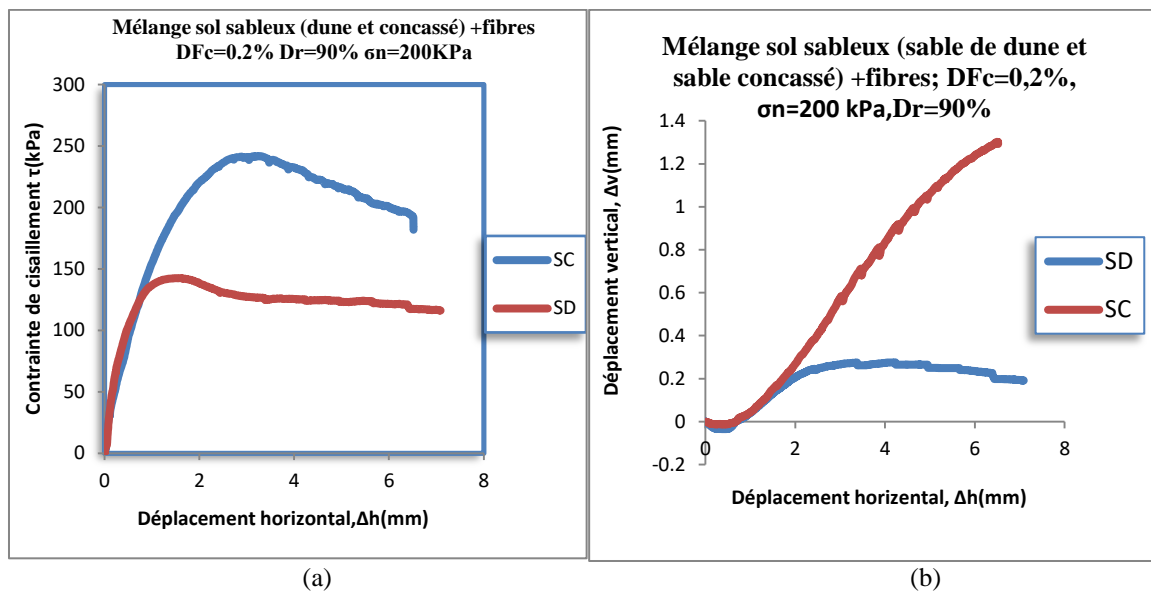


Figure 4.9 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=200\text{ kPa}$, $DF_c=0.2\%$)
 (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical

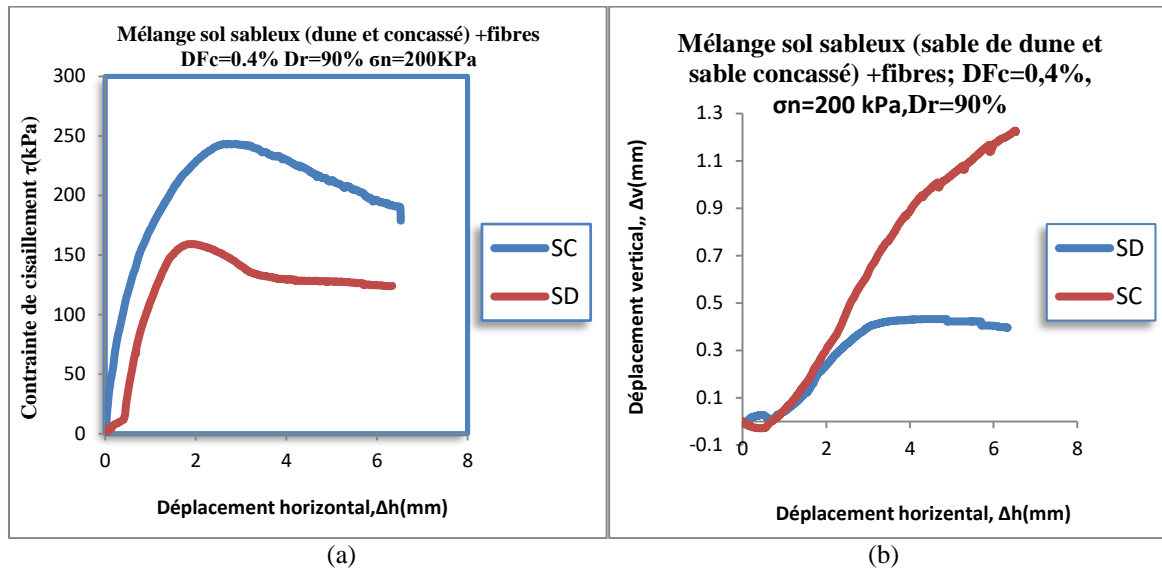


Figure 4.10 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=200$ kPa, $DF_c=0.4\%$)
 (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical

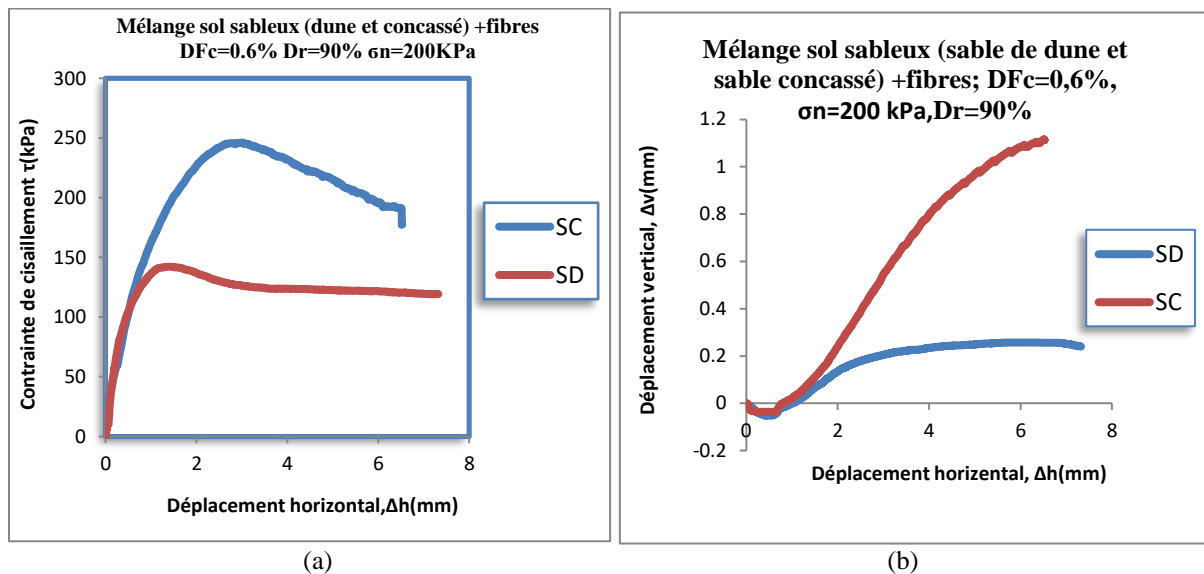


Figure 4.11: Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=200$ kPa, $DF_c=0.6\%$)
 (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical

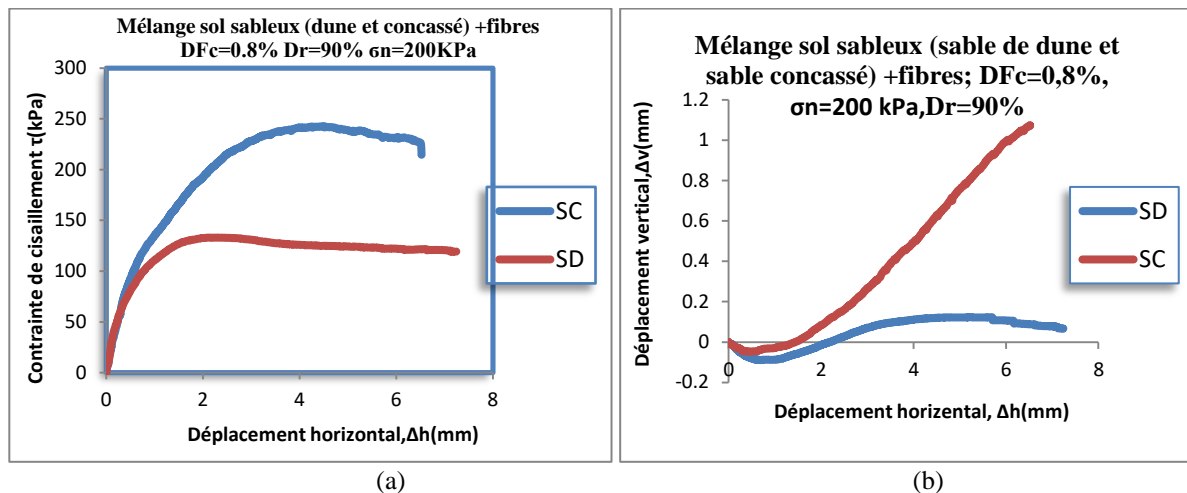
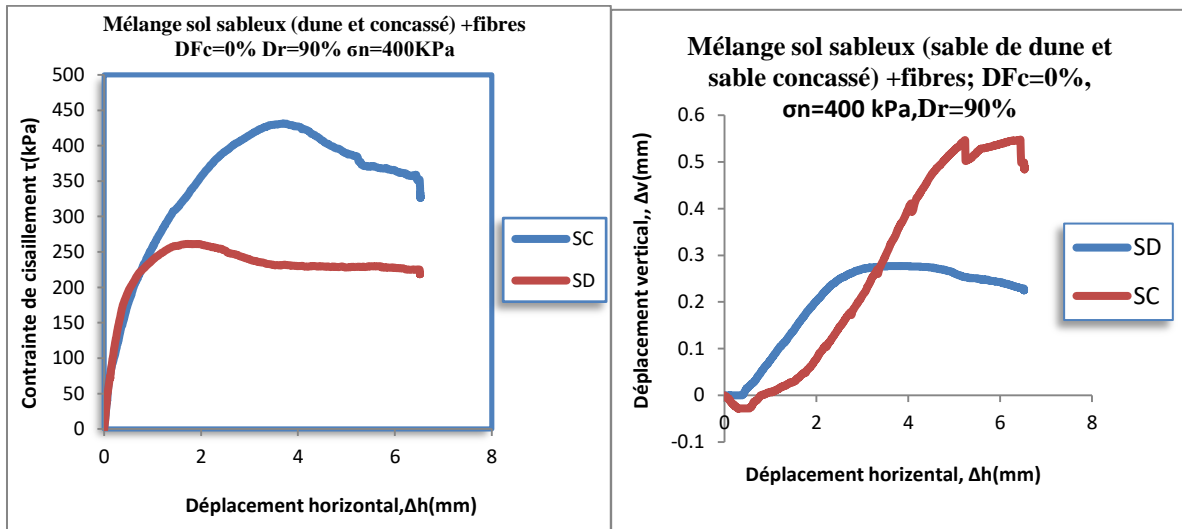


Figure 4.12 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=200$ kPa, $DF_c=0.8\%$)
 (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical

4.2.2.3 Contrainte normale initiale élevée, $\sigma_n=400$ kPa

Les résultats des essais de cisaillement direct à la boîte sont présentés dans les Figures (4.13 – 4.17) pour évaluer l'impact de la forme des particules des différents types de sols sableux (sable de dune et sable concassé) sur la réponse mécanique des mélanges avec des fibres de doum. En laboratoire, les échantillons utilisés dans ces essais ont été préparés en utilisant la technique de pluviation à sec, avec des proportions variables de fibres de doum ($DF_c=0\%$ - $0,8\%$), et en les soumettant à une contrainte normale initiale élevée de $\sigma_n=400$ kPa. D'après l'analyse de ces graphiques, il est observé que la résistance au cisaillement maximale augmente progressivement avec l'augmentation de la teneur en fibres de doum pour les deux catégories de sable étudiées. De plus, les résultats obtenus révèlent que les mélanges contenant du sable concassé présentent une amélioration significative de la résistance au cisaillement maximale pour des fractions de fibres de doum élevées et moyennes, telles que $DF_c = 0,6$ et $0,8\%$ (avec une augmentation de la résistance au cisaillement de respectivement $0,078\%$ et $2,26\%$). Cette amélioration est encore plus marquée par rapport aux échantillons préparés avec du sable de dune pour les fractions de fibres plus faibles, avec une DF_c de $0,2$ et $0,4\%$ (avec une augmentation de la résistance au cisaillement de $3,61\%$ et $2,32\%$ respectivement). L'analyse des schémas de déplacement vertical-horizontal (Figures 4.13b-4.17b) met en évidence que la forme des particules anguleuse accentue la dilatation des différents mélanges de sols sableux avec des fibres de doum, entraînant ainsi une augmentation de la résistance au cisaillement. Cela est dû à la forme des grains qui s'emboîtent les uns dans les autres, limitant la contractance du matériau sous l'effet des contraintes de cisaillement pour le sable concassé. Cette imbrication des particules anguleuses

restreint la déformation, d'où le comportement dilatant observé. À l'inverse, les particules sphériques du sable de dune facilitent leur réarrangement quand une contrainte de cisaillement est appliquée. Le sable de dune se déforme alors plus aisément, ce qui se traduit par une réponse mécanique moins stable et moins dilatante.



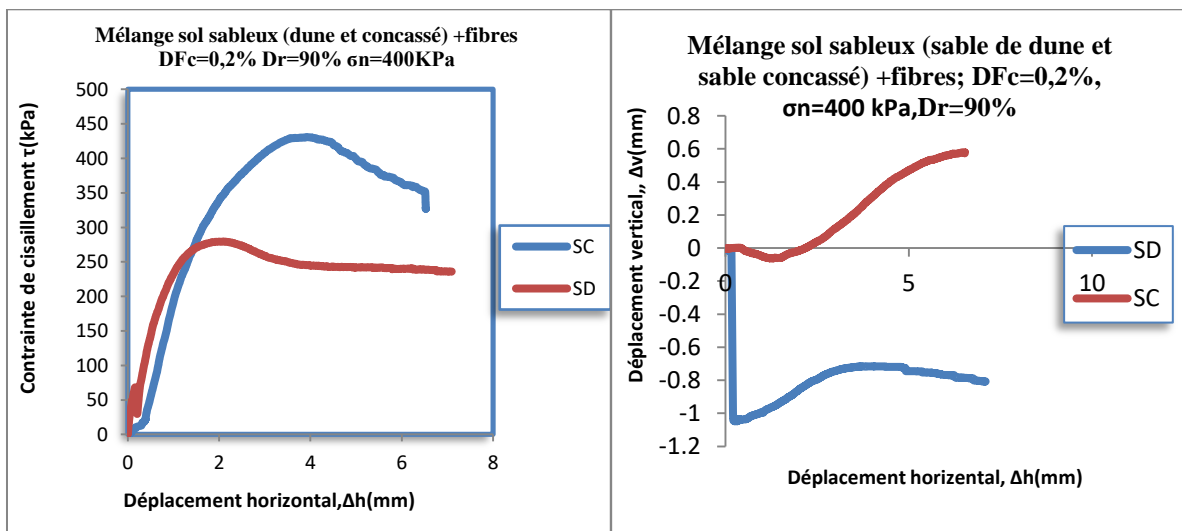
(a)

(b)

Figure 4.13 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=400\text{ kPa}$, , DFc=0%)

(a)- Evolution de contrainte de cisaillement.

(b)-Evolution de déplacement vertical



(a)

(b)

Figure 4.14 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=400\text{ kPa}$, DFc=0.2%)

(a)- Evolution de contrainte de cisaillement.

(b)-Evolution de déplacement vertical

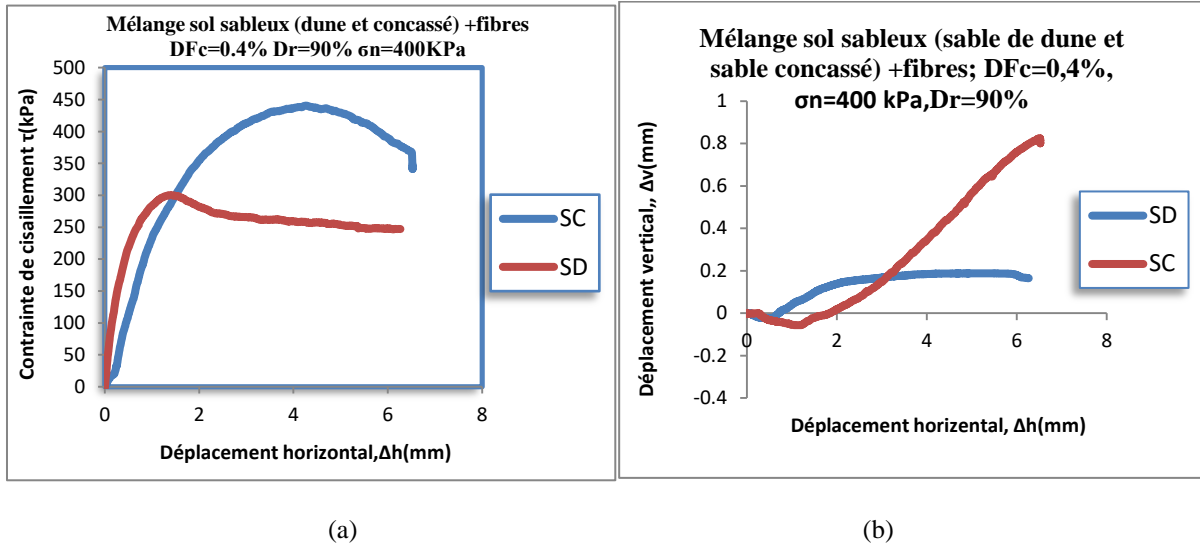


Figure 4.15 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n = 400 \text{ kPa}$, $DF_c = 0.4\%$)
 (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical

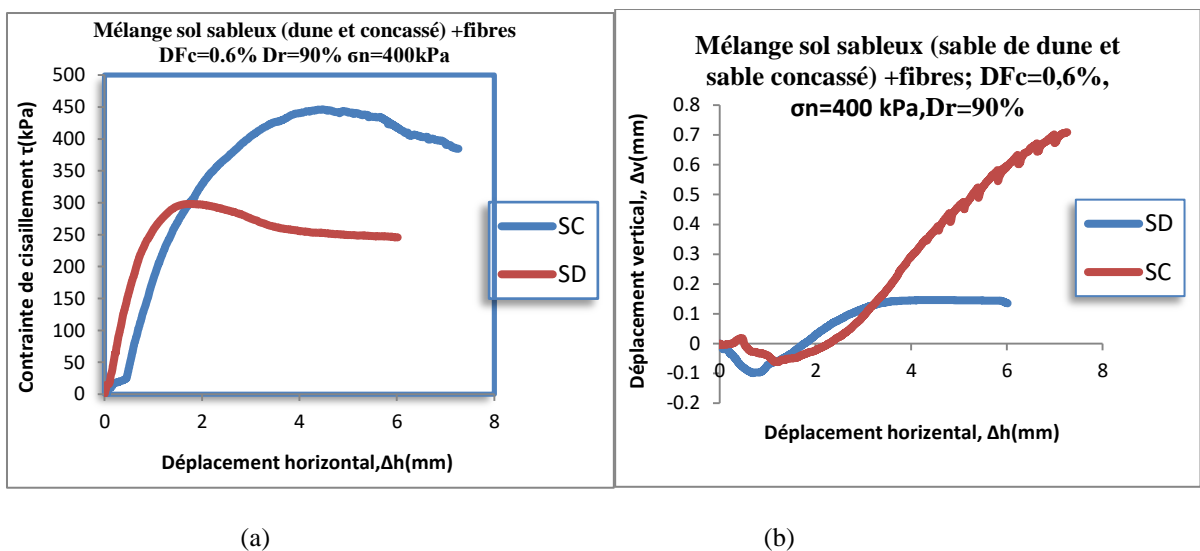


Figure 4.16 : Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n = 400 \text{ kPa}$, $DF_c = 0.6\%$)
 (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical

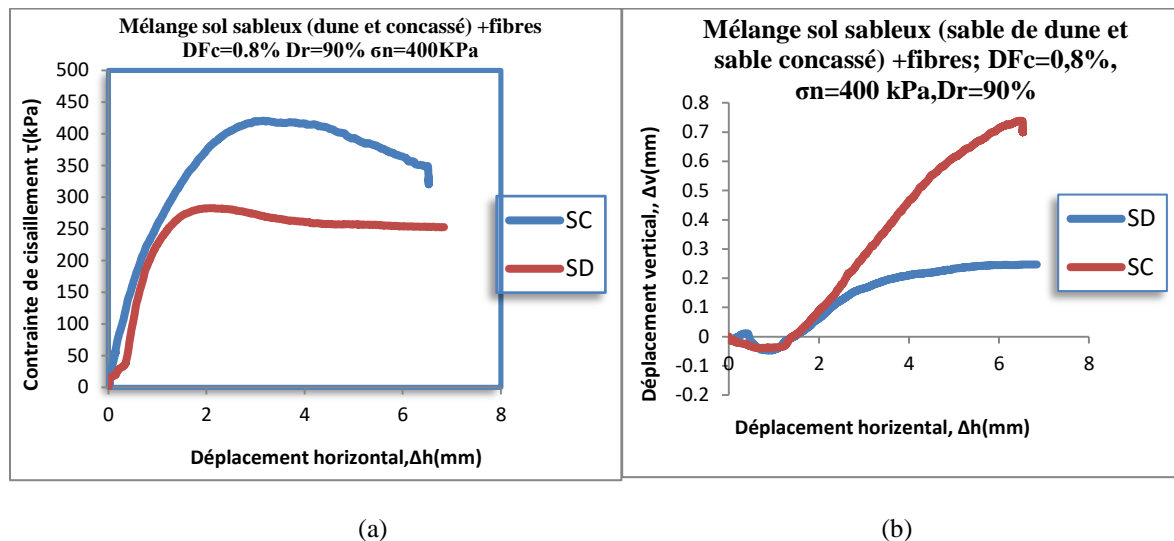


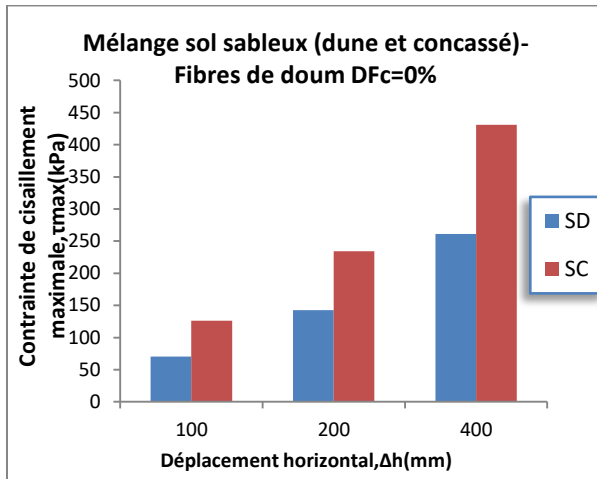
Figure 4.17: Effet de la forme des particules sur le comportement mécanique ($\sigma_n=400$ kPa, $D_{F_c}=0,8\%$)
 (a)- Evolution de contrainte de cisaillement. (b)-Evolution de déplacement vertical

4.2.3 Influence de la forme des particules et de la contrainte normale initiale sur la résistance au cisaillement maximale

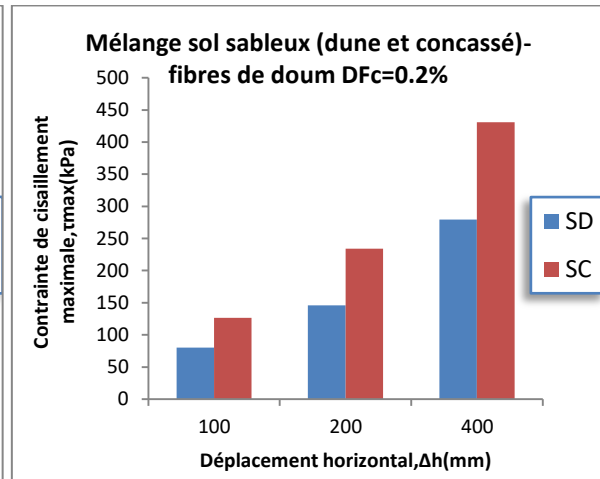
L'objectif des essais dont les résultats sont présentés dans les Figures 4.1 à 4.17 était d'évaluer les effets combinés de deux paramètres clés sur la résistance au cisaillement maximale de mélanges de sols sableux renforcés par des fibres de doum. La forme des particules de sol sableux, soit anguleuses pour le sable concassé, soit arrondies pour le sable de dune. La contrainte normale initiale appliquée sur les échantillons, avec trois niveaux testés : 100, 200 et 400 kPa. Les échantillons ont été préparés par déposition sec, en mélangeant les sols sableux avec des teneurs en fibres de doum variables allant de 0% à 0,8%. La Figure 4.18 résume l'ensemble des résultats obtenus pour les cinq teneurs en fibres étudiées (0%, 0,2%, 0,4%, 0,6% et 0,8%). Il en ressort clairement que ces deux paramètres, la forme des particules et la contrainte normale initiale, influencent de manière significative la résistance au cisaillement maximale mesurée. Plus précisément, une augmentation de la contrainte normale appliquée sur les échantillons entraîne une nette amélioration de leur résistance au cisaillement maximale, quelle que soit la teneur en fibres de doum incorporée. D'autre part, la forme des particules de sol sableux a un impact majeur. Pour une même teneur en fibres et un même niveau de contrainte normale, les mélanges sable concassé-fibres de doum présentent systématiquement une résistance au cisaillement maximale supérieure à celle des mélanges sable de dune-fibres de doum. Ainsi, la forme anguleuse des grains de sable concassé, combinée à l'effet de renfort apporté par les fibres de doum, permet de développer un meilleur enchevêtrement et une structure granulaire plus rigide et stable, capable de mieux résister aux

Chapitre 4 : Effet de divers paramètres sur la réponse mécanique des mélanges sol sableux (sable de dune et sable concassé) -fibres de doum

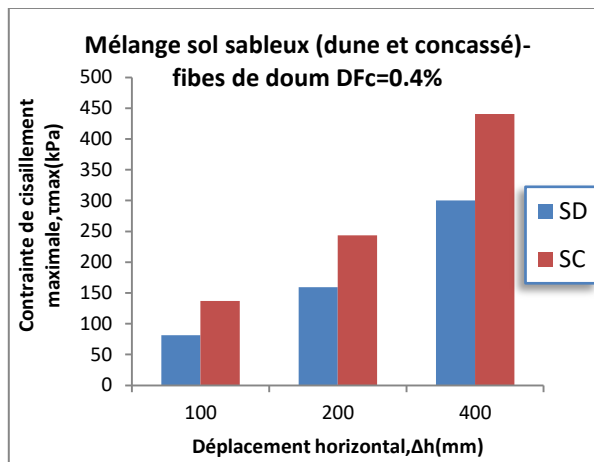
contraintes de cisaillement avant rupture. C'est cette capacité accrue à s'opposer à la déformation par cisaillement qui explique les valeurs de résistance au cisaillement maximale plus élevées mesurées pour les mélanges sable concassé-fibres comparés aux mélanges sable de dune-fibres.



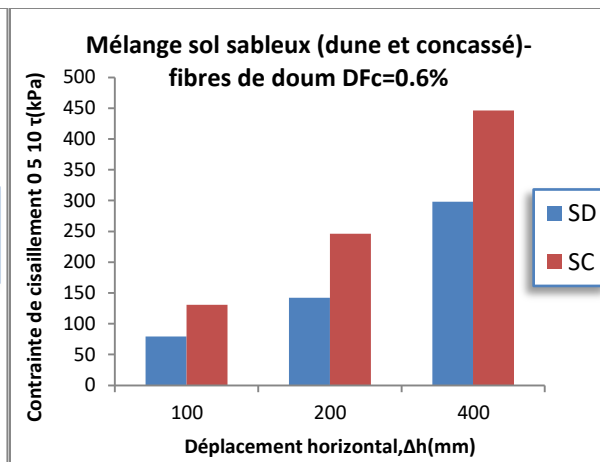
(a)



(b)



(c)



(d)

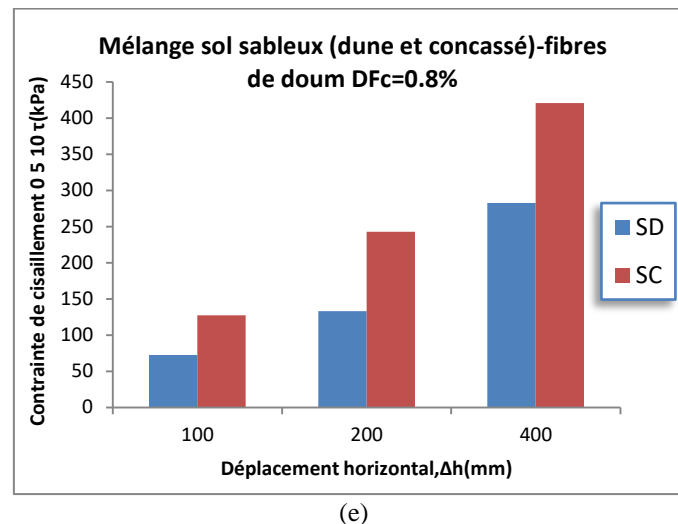


Figure 4.18 : Résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte initiale des mélanges sol sableux (dune et concassé) –fibres de doum (a)-DFc=0%, (b)-DFc=0,2%, (c)-DFc=0,4%, (d)-DFc=0,6%, (e)-DFc=0,8%

4.3. Influence de la forme des particules sur l'angle de frottement

La Figure 4.19 présente les résultats obtenus concernant l'impact de la forme des particules de sol sableux sur l'angle de frottement interne des mélanges sable-fibres de doum. Les échantillons ont été préparés par une méthode de dépôt à sec visant à obtenir une densité relative initiale très élevée de 90%. Ces résultats mettent clairement en évidence l'effet de la forme des particules sur l'angle de frottement mesuré, et ce pour les différentes teneurs en fibres de doum étudiées (0%, 0,2%, 0,4%, 0,6% et 0,8%). De manière générale, on constate que les mélanges réalisés avec le sable concassé, dont les grains sont anguleux, présentent des valeurs d'angle de frottement plus élevées que les mélanges avec le sable de dune, composé de grains sphériques. Cet écart est observé pour toutes les proportions de fibres testées. L'impact bénéfique de la forme anguleuse des grains de sable concassé sur l'angle de frottement est particulièrement marqué pour une teneur en fibres de 0,6%. À cette proportion, l'augmentation de l'angle de frottement par rapport au mélange sable de dune-fibres (0,4%) est très significative, comme le montre clairement la Figure 4.19. Ceci démontre le rôle primordial joué par la forme anguleuse des grains de sable concassé, qui favorise leur enchevêtrement et crée une structure granulaire plus rigide et stable. L'ajout de fibres de doum à ces mélanges sable concassé renforce encore cette structure en améliorant le frottement intergranulaire. La synergie de ces deux effets permet d'expliquer les valeurs d'angle de frottement élevées obtenues, nettement supérieures à celles des mélanges sable de dune-fibres.

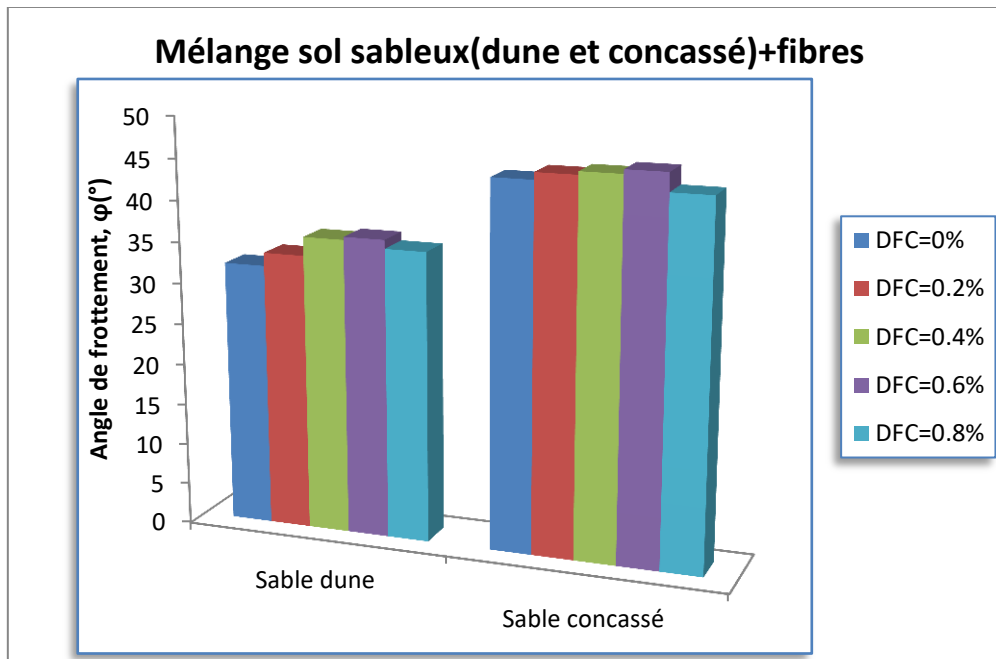


Figure 4.19 : Effet de la forme des particules sur l'angle de frottement des mélanges étudiés.

4.4 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats d'une campagne d'essais de cisaillement direct réalisés sur des mélanges de sols sableux (sable de dune et sable concassé) renforcés par des fibres de doum. L'objectif était d'évaluer l'influence de deux paramètres clés sur la réponse mécanique de ces mélanges ; la contrainte normale initiale appliquée (100, 200 et 400 kPa) et la forme des particules de sol (grains anguleux pour le sable concassé ou grains sphériques pour le sable de dune). Les échantillons ont été reconstitués au laboratoire en mélangeant les sols sableux avec différentes teneurs en fibres de doum allant de 0% à 0,8% par incréments de 0,2%. Les résultats obtenus montrent clairement que la réponse mécanique des mélanges sol sableux-fibres de doum, en termes de résistance au cisaillement et d'angle de frottement interne, est fortement influencée par la contrainte normale initiale et la forme des particules de sable. Plus précisément, une augmentation de la contrainte normale appliquée entraîne une nette amélioration des performances mécaniques (résistance au cisaillement maximale et angle de frottement). Par ailleurs, la forme anguleuse des particules de sable concassé, comparée aux particules sphériques du sable de dune, conduit à des valeurs significativement plus élevées de résistance au cisaillement maximale et d'angle de frottement interne pour les mélanges sable concassé-fibres. Cet effet bénéfique de la forme anguleuse s'explique par la

création d'une structure granulaire plus rigide et stable grâce à l'imbrication des grains, renforcée par l'ajout des fibres de doum qui accroissent les forces intergranulaires entre eux.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif principal de cette recherche expérimentale est d'étudier de manière approfondie l'impact de la teneur en fibres de doum sur le comportement mécanique des mélanges de deux sables (dune et concassé) -fibres de doum. Le travail consiste à effectuer une série d'essais de cisaillement direct en utilisant la boîte de Casagrande sur différents échantillons de sol sableux (sable de dune et sable concassé) renforcés par des fractions de fibres de doum allant de 0% à 0.8%, avec des incréments de 0,2%. Les échantillons ont été préparés en laboratoire à une densité relative initiale (dense $D_r = 90\%$), et soumis à trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 400 kPa). Cette étude nous a également permis d'analyser les effets de certains paramètres tels que la forme des particules et la contrainte normale initiale sur le comportement mécanique des mélanges de sables (dune et concassé) et de fibres de doum.

Les résultats des tests réalisés sur divers mélanges mettent en évidence l'impact significatif de l'incorporation de fibres de doum sur le comportement mécanique des sols sableux, à savoir le sable de dune et le sable concassé. Cette influence se manifeste notamment à travers l'augmentation de la résistance au cisaillement maximale, de la résistance au cisaillement maximale normalisée et de l'angle de frottement. Ces constatations soulignent ainsi le rôle crucial des fibres de doum dans le renforcement et l'amélioration des caractéristiques mécaniques des sols sableux. De plus, il est observé que la résistance maximale au cisaillement augmente proportionnellement à la proportion de fibres de doum, atteignant un seuil de $DF_c=0,4\%$ pour le sable de dune et de $DF_c=0,6\%$ pour le sable concassé. Cependant, au-delà de ces seuils, une tendance inverse est observée pour tous les échantillons, mettant en évidence des corrélations importantes dans la relation entre la teneur en fibres de doum et les propriétés mécaniques des sols sableux.

Selon les résultats obtenus, il est évident que l'augmentation de la fraction de fibres de doum entraîne généralement une augmentation de l'angle de frottement, atteignant un point limite de $DF_c=0,4\%$ pour le mélange sable de dune-fibre de doum et de $DF_c=0,6\%$ pour le mélange sable concassé-fibre de doum, en considérant tous les paramètres sélectionnés. Cependant, au-delà de ce seuil de fibres, une tendance inverse a été observée. De plus, une corrélation peut être établie entre l'angle de frottement et la teneur en fibres de doum en utilisant une relation polynomiale qui prend en compte tous les paramètres testés.

Les résultats obtenus mettent en évidence le rôle crucial de la forme des particules dans l'amélioration de la résistance au cisaillement des mélanges examinés. Les mélanges contenant du sable concassé et des fibres de doum présentent une résistance au cisaillement

plus élevée que ceux contenant du sable de dune et des fibres de doum. Par ailleurs, il est observé que la résistance au cisaillement augmente progressivement avec l'augmentation de la contrainte normale initiale pour toutes les teneurs en fibres de doum étudiées.

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

1. Examiner les effets de différentes méthodes de préparation des échantillons en reproduisant le même programme expérimental. Cela pourrait aider à évaluer l'influence de ces méthodes sur les résultats obtenus.
2. Réaliser une étude approfondie sur l'impact de la teneur en fibres de doum sur le comportement mécanique des sables de dune et concassé en utilisant des essais avec l'appareil triaxial statique et cyclique pour tous les paramètres étudiés. Cela permettrait d'obtenir une compréhension plus complète des propriétés mécaniques des mélanges sable-fibres de doum dans des conditions de chargement plus complexes.

Références bibliographiques

- 1. Amine Taibi, Youcef Mahmoudi, Abdellah Cherif Taiba, Hamou Azaiez & Mostefa Belkhatir(2023):** ‘Fly Ash Effects on the Stress-Dilatancy Relation of Coarse Soils: Particle Morphology Role. *Geotechnical and Geological Engineering* vol 41, pages2517–2536.
- 2. Arab A, Belkhatir M (2012)** "Fines Content and Cyclic Preloading Effect on liquefaction Potential of Silty Sand : A Laboratory Study". *Acta Polytechnica Hungarica*. Vol.9 No. 4, PP 47-64.
- 3. Azaiez, H., Cherif Taiba, A., Mahmoudi, Y. Belkhatir, M., (2020)** :Shear Characteristics of Fly Ash Improved Sand as an Embankment Material for Road InfrastructurePurpose. *Innov.Infrastruct.Solut.* 6,148 <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00517-w>.
- 4. Babu g. L. Sivakumar and a. K. Vasudevan(2007)**1Evaluation of strength and stiffness response ofcoir-fibre-reinforced soil, 11No. 3, 111–116 Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India
- 5. Belkhatir. M, Schanz, T, Arab, A (2012)** "Effect of fines content and void ratio on the saturated hydraulic conductivity and undrained shear strength of sand–silt mixtures", *Environmental Earth Sci ences* 70, 24 69–79. DOI : 10.1007=s12665-013-2289-z.
- 6.Della N, Arab A, Belkhatir M, et Missoum H, (2011)** "Effect of confining pressure and depositional method on the undrained shearing response of medium dense sand, " *Journal of Iberian Geology*, Vol. 37, No. 1, pp. 37-44.
- 7. Elakeb. S et Elhabchi. N (2023)** ‘Etude en laboratoire sur l’effet des fibres naturelles (fibres de doum) sur le comportement mécanique des sols granulaires’. Mémoire master 2 géotechnique. Université Hassiba Benbouali de CHLEF.
- 8. Flitti, A, Della, N Ramiro D. Flores, V (2016)**"experimental study of the shear resistance of granular material: influence of initial state. *Journal of the oretical and applied mechanics*", DOI:10.15632/jtam-pl.55.2.523.
- 9. Mahmoudi Y, Cherif Taiba A, Belkhatir M, Schanz T (2018)** : Experimental Investigation into the influence of roundness and sphericity on the undrained shear response of silty sand soils. *Geotech Test J*. <https:// doi. org/ 10. 1520/ GTJ20 170118>.

- 10. Megrouse M et Maameri W (2021)** "Investigation expérimentale sur l'effet de charbon biologique sur la résistance au cisaillement du sable de Chlef". Mémoire master 2 géotechnique. Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- 11. Missoum Benziane, Noureddine Della, Sedat Sert, Sidali Denine, Said Nouri, Ertan Bol & Abdelnacer Boukeffoussa Elroul (2021):** Shear behaviour of sandy soil from Chlef river reinforced with different types of fibres, Marine Georesources & Geotechnology, DOI: 10.1080/1064119X.2021.1984619.
- 12. Mulilis J.Paul, Seed H. Bolton, Clarence K. Chan et James K. Mitchell (1977) "** Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction ".
- 13. Nahar et messaadia (2022)** "Investigation expérimentale sur la caractérisation mécanique du sable de dune mélangé avec les fibres de palmier". Mémoire master 2 géotechnique. Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- 14. Sujath A. Ponmathi, A. Doss, S. Muthukumarasamy, V. R. Mohan (2018) "**Study of Antioxidant Activity of Barleria Courtrallica", DOI : 10.26479/2018.0405.42.
- 15. Sujatha, P. Atchaya, S. Darshan & S. Subhashini (2020):** Mechanical properties of glass Fibre reinforced soil and its application as subgrade reinforcement, Road Materials and Pavement Design, DOI <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1746387>.
- 16. Troncoso J.H. (1990)** "Failure risks of abandoned tailings dams", proceedings, Int. Sympon safety and rehabilitation of Tailings Dams, CIGB ICOLD, Sydney, Australia, pp.34-47.
- 17. Yang, J., and Wei, L.M., (2012),** "Collapse of loose sand with the addition of fines: the role of particle shape," Geotechnique., Vol 62, No. 12, pp, 1111–1125
- 18. Yang, J., and X. D. Luo. (2015)** "Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials." J. Mech. Phys. Solids 84: 196– 213. DOI.org/10.1016/j.jmps.2015.08.001
- 19. N. R. Malidarreh, I. Shooshpasha, S. M. Mirhosseini & M. Dehestani (2017):** Effects of reinforcement on mechanical behaviour of cement treated sand using direct shear and triaxial tests, International Journal of Geotechnical Engineerin