

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 بوعلي- 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

Investigation expérimentale de l'effet de la taille des particules de verre concassé sur la réponse mécanique des sols granulaires

❖ Présenté par :
REZALI Merouane
GHOZLI Riadh

❖ Dirigé par :
Dr. Mahmoudi Youcef

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. Mahmoudi Youcef** 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. Cherif Taiba Abdellah**, le professeur **Belkhatir Mostefa** 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 aide et soutien 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, mon Père
REZALI LARBI ma Mère MELANI BAKHTA 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 LHADJA ET NAWAL

Mes frères qui sont mes époles : Mohamed, Walid,

Mes nièces qui j'aime beaucoup

*Mes amies : Sid Ahmed, Khalil, Abd Errahmane, Khalil,
Rédha, Youcef, Khair eddine , Otmane et Rachid, Adel, Binali*

*A mes collègue d'option géotechnique : LABANI Cherifa, Med
Fadel Bohey , Dah Abdellah et Tj bouziane SL salah Th
Mahfoudh , LI Abd Elkadir ...*

*A mes collègue d'option Structure : Bilal , Imad , Aymen , KH
Ft ...*

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

REZALI Merouane

Dédicace

Je dédie ce travail à :

*Celui qui ne viendra pas comme lui et personne ne prendra sa
Place, Mon Cher mère BOUNGARE Rabiaa (que Allah ait pitié
de lui).*

*La source de la sécurité, de l'amour et de la tendresse,
le soutien qui ne se penche pas Ma chère père GHOZLI Ali.*

Mes sœurs : Samia, ASSIA, Souhaila.

Mes frères : Boumediene, Houssam

Mes chères amies : Yassine, Seddik,

Ma femme : Sebaa Abir

Ma fille : sejour

A Mes collègues options génie civil

A tout ceux que je porte dans mon cœur.

GHOZLI Riadh

Et enfin ceux qui sont présents dans mon cœur

Merci

SOMMAIRE

Résume en Arabe.....	I
Abstract	II
Résumé	III
Liste des Symboles.....	IV
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction	5
1.2. Influence de la taille des particules et la teneur en déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols	5
1.2.1. Taille de particules	5
1.2.2. Teneur en déchets de verre recyclé	9
1.3. Effet des quelques facteurs sur la réponse mécanique des sols.....	13
1.3.1. Teneur en Kaolin.....	13
1.3.2. Teneur en cendres volantes	15
1.3.3. Forme des grains	18
1.4. Conclusion.....	29

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 Objectif du l’essai.....	22
2.2.3 Instruments	22
2.2.4 Principe de fonctionnement.....	23
2.2.5 Détermination des propriétés intrinsèques du sol	24
2.3. Matériaux utilisés.....	25
2.4. Procédure de l’essai	29
2.4.1 Introduction.....	29
2.4.2 Reconstruction de l'échantillon	30
2.5.Conclusion.....	30

CHAPITRE III

IMPACT DE L'INCORPORATION DE DECHETS DE VERRE RECYCLE SUR LES PROPRIETES MECANIKES DES SOLS GRANULAIRES

3.1 Introduction.....	34
3.2. Résultats des essais réalisés	35
3.2.1. Diamètre maximal ; $D_{max}=0.5$ mm	35
3.2.2. Diamètre maximal ; $D_{max}=2$ mm	37
3.2. 3. Diamètre maximal ; $D_{max}=4$ mm	40
3.3. Effet de la teneur de en déchets de verre recyclé sur la résistance au cisaillement maximale.....	42

3.4. Influence de la teneur en déchets de verre recyclé sur la résistance au cisaillement normalisée.....	47
3.5. Influence de la teneur en déchets de verre recyclé sur l'angle de frottement.....	48
3.6. Conclusion	50

CHAPITRE IV

INFLUENCE DE LA TENEUR EN DECHETS DE VERRE RECYCLE SUR LE COMPORTEMENT MEACANIQUE DES SOLS SABLEUX.

4.1 Introduction.....	53
4.2. Résultats des essais réalisés 4.2.1. Sable de Chlef renforcé par 10% de déchets de verre recyclé ; WRG=10%.....	54
4.2.2. Sable de Chlef renforcé par 20% de déchets de verre recyclé ; WRG=20%.....	57
4.2.3. Sable de Chlef renforcé par 30% de déchets de verre recyclé ; WRG=30%.....	60
4.3. Effet la taille de déchets de verre recyclé sur la résistance au cisaillement maximale..	63
4.4. Influence de la taille de déchets de verre recyclé sur l'angle de frottement.....	66
4.5. Conclusion	67
Conclusion générale.....	70
Références bibliographiques	68

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II

Tableau 2.1 : Composition chimique de la taille des particules de verre concassé

(Bayai et al 2020)..... 28

Tableau 2.2 : Propriétés physiques du mélange sable Chlef-déchets de verre recyclé..... 28

Tableau 2.3 : Les masses calculées pour les échantillons préparés par pluviation à sec..... 30

CHAPITRE III

Tableau 3.1: Coefficient A, B, C et R^2 pour l'équation (3.1) 43

Tableau 3.2 : Coefficients A, B, C et R^2 pour équation (3.2) 49

CHAPITRE IV

Tableau 4.1 : Coefficients A, B, C et R^2 pour équation (4.1) 66

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure 1.1: Influence de coefficient d'uniformité sur la résistance au cisaillement non drainée des matériaux granulaires, (a) sable d'Hostun (b) billes de verre (Liu et al. 2014). 6

Figure 1.2 : Réponse non-drainée du sable de Chlef (a) Evolution du déviateur de contrainte (b) Evolution de la surpression interstitielle (c) Le chemin de contrainte de sable de Chlef. Hazout (2017). 7

Figure 1.3 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-cendres volantes ($D_{min} = 0.08$ mm, $\sigma_n=100$ kPa, $Dr=25\%$, $FA=0\%$) (a) - Evolution de contrainte de cisaillement (b) - Evolution de déplacement vertical Merni et Elezaar. (2019). 8

Figure 1.4: Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-cendres volantes ($D_{min} = 0.08$ mm, $\sigma_n=100$ kPa, $Dr=25\%$, $FA=15\%$) (a) - Evolution de contrainte de cisaillement (b) - Evolution de déplacement vertical Merni et Elezaar. (2019). 9

Figure 1.5 : Résistance non confinée pendant 7 jours en fonction de poudre de verre (Mohammed Ali et al 2022)..... 10

Figure 1.6 : (a) Relation entre (ϕ) et DPV. (b) Relations entre cohésion et DPV (Blayi et al 2020).....	11
Figure 1.7 : Variation du γ_{dmax} et de ω_{opt} en fonction de déchets de verre (Cabalar et al 2020).	12
Figure1.8 : Effet de la fraction de poudre de verre sur le comportement mécanique ($\sigma_n = 100$ kPa, $D_r = 20\%$).(a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	13
Figure 1.9: Comportement mécanique des échantillons de mélange sable-kaolinite à pression de confinement de 100 kPa. (a) Evolution du déviateur de contrainte (b) Evolution de la pression interstitielle Bayat et al. (2012)	14
Figure 1.10 : Effet de la fraction de kaolin sur le comportement mécanique de sable de Chlef Bouchibane, Ben Abdel-Mouttaleb (2020).....	15
Figure 1.11: Influence de teneur en cendres volantes sur la résistance au cisaillement non drainée de sols granulaires Kermatikerman et al. (2018)	16
Figure 1.12: Effet de la fraction de cendres volantes sur le comportement mécanique ($\sigma_n=100$ kPa, $D_r=55\%$) (a)- Evolution de contrainte de cisaillement (b) - Evolution de déplacement vertical Bouchibane et Ben Abdel-Mouttaleb (2020).....	17
Figure 1.13 : Résistance au cisaillement non drainé au pic versus les caractéristiques de forme des grains Cherif Taiba et al (2018).	18

CHAPITRE II

Figure 2.1 : Appareil de cisaillement utilisé dans cette étude.	21
Figure 2.2: Les accessoires de la boîte de cisaillement	22
Figure 2.3 : Plan de la contrainte normale (N) et tangentielle (T).....	23
Figure 2.4 : La courbe intrinsèque des sols.	24
Figure 2.5 : Les matériaux utilisées : Sable de Chlef, Mélange sable + déchets de verre recyclé.....	25

Figure 2.6 : Courbes granulométriques des matériaux étudiés.....	26
Figure 2.7 : Variation des indice des vides en fonction de la teneur en taille des particules de déchets de verre recyclé.....	27
Figure 2.8 : méthode de préparation des échantillons (Etat dense)	29

CHAPITRE III

Figure 3.1 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=0.5$ mm ; $\sigma_n=100$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	36
Figure 3.2 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=0.5$ mm ; $\sigma_n=200$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	36
Figure 3.3 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=0.5$ mm ; $\sigma_n=300$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	37
Figure 3.4 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=2$ mm ; $\sigma_n=100$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	39
Figure 3.5 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=2$ mm ; $\sigma_n=200$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	39
Figure 3.6 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=2$ mm ; $\sigma_n=300$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	40
Figure 3.7 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=4$ mm ; $\sigma_n=100$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement	

vertical 41

Figure 3.8 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=4$ mm ; $\sigma_n=200$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical 42

Figure 3.9 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=4$ mm ; $\sigma_n=300$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical 42

Figure 3.10: Résistance au cisaillement maximal en fonction de la contrainte initial (a)- $D_{max}=0.5$ mm , (b)- $D_{max}=2$ mm ,(c)- $D_{max}=4$ mm 45

Figure 3.11: Effet de la teneur en poudre de verre et la contrainte normale initiale sur la résistance au cisaillement maximale (a)- $D_{max}=0.5$, (b)- $D_{max}=2$, (c)- $D_{max}=4$ 46

Figure 3.12 : Impact de la teneur en déchets de verre recyclé sur résistance au cisaillement normalisée (τ/σ_n) 48

Figure 3.13 : Angle de frottement en fonction de déchets de verre recyclé pour les matériaux 50

CHAPITRE IV

Figure 4.1 : Effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique (WRG=10% ; $\sigma_n=100$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical..... 56

Figure 4.2 : Effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique (WRG=10% ; $\sigma_n=200$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical..... 57

Figure 4.3 : Effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique (WRG=10% ; $\sigma_n=300$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical..... 57

Figure 4.4 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=2$ mm ; $\sigma_n=100$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical 59

Figure 4.5 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=2$ mm ; $\sigma_n=200$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical 59

Figure 4.6 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{\max}=2$ mm ; $\sigma_n=300$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	60
Figure 4.7 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{\max}=4$ mm ; $\sigma_n=100$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	62
Figure 4.8 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{\max}=4$ mm ; $\sigma_n=200$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	63
Figure 4.9 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{\max}=4$ mm ; $\sigma_n=300$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	63
Figure 4.10: Résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte normal initiale (a)-WRG=10 %, (b)-WRG=20 %, (c)-WRG=30 %	65
Figure 4.11: Angle de frottement en fonction de Teneur en déchets de verre recyclé , WRG (%)	67

الملخص

إن إضافة مواد مثل النفايات الزجاجية المعاد تدويرها يمكن أن يكون لها تأثير كبير على الخصائص الميكانيكية للتربة. على وجه التحديد، في مجال الهندسة الجيوتقنية، فإن دمج نفايات الزجاج المعاد تدويرها في التربة يمكن أن يعزز خصائصها الميكانيكية والجيوتقنية، وخاصة قوة القص. يقدم هذا النهج أيضاً فوائد بيئية من خلال تمكين إعادة استخدام النفايات الزجاجية المعاد تدويرها والتي كان من الممكن أن يتم توجيهها إلى مدافن النفايات. في هذا السياق، تقترح هذه الدراسة على (مم، 2.00 مم، و 0.5 مم $D_{max} = 4.00$) دراسة تجريبية لتأثير حجم جسيمات مخلفات الزجاج المعاد تدويره الاستجابة الميكانيكية للتربة الحبيبية. بالإضافة إلى ذلك، يتم تنفيذ بروتوكول تجريبي باستخدام جهاز صندوق القص لفهم سلوك هذه المادة وتأكيد الارتباطات المحتملة بين حجم الجسيمات من النفايات الزجاجية المعاد تدويرها كازغروني وقوة القص القصوى لعينات التربة الحبيبية، وخاصة رمل الشلف الممزوج بمحتويات مختلفة من نفايات الزجاج المعاد تدويرها. تم تحضير العينات في المختبر باستخدام تقنية تحضير الترتيب. $WRG=0\%$ إلى $WRG=30\%$ تدويرها تتراوح من وكثافة نسبية (كيلو باسكال، 200 كيلو باسكال، 300 كيلو باسكال $\sigma = 100$) الجاف وإخضاعها لثلاثة ضغوط عادية أولية تشير نتائج اختبارات القص المباشر إلى أن حجم حبيبات نفايات الزجاج المعاد تدويره بدلالة القطر ($D_r = 90\%$) ثابتة يتحكم بشكل كبير في الاستجابة الميكانيكية لمخاليط نفايات الزجاج المعاد تدويرها برمل الشلف. تؤدي (D_{max}) الأقصى زيادة الحد الأقصى لقطر النفايات الزجاجية المعاد تدويرها إلى تحسن ملحوظ في أقصى قوة للقص وزاوية الاحتكاك، مما ($WRG = 0\%$ ، 10% ، 20%) يؤدي إلى زيادة كبيرة في مرحلة التمدد، لجميع أجزاء النفايات الزجاجية المعاد تدويرها (30%) درسوا المستويات الثلاثة المختارة للضغط الطبيعي. علاوة على ذلك، وجد أن مخلفات الزجاج المعاد تدويرها تعد عاملاً مهماً لتعزيز مقاومة القص في التربة الرملية، حيث تؤدي زيادة نسبتها إلى تحسين منهجي للسلوك الميكانيكي الكلمات المفتاحية: التربة الحبيبية، الزجاج المعاد تدويره، صندوق القص كازاغراندي، حجم الحبيبات، قوة القص

ABSTRACT

The addition of materials such as recycled glass waste can have a paramount effect on the mechanical characteristics of soils. Specifically, in the field of geotechnical engineering, incorporating recycled glass waste into soils can enhance their mechanical and geotechnical properties, particularly their shear strength. This approach also presents environmental benefits by enabling the reuse of recycled glass waste that would otherwise be destined for landfills. In this context, this study proposes an experimental investigation into the influence of the particle size of recycled glass waste (D_{\max} = 4.00 mm, 2.00 mm, and 0.5 mm) on the mechanical response of granular soils. Additionally, an experimental protocol is implemented using the Casagrande shear box device to understand the behavior of this material and confirm potential correlations between the particle size of recycled glass waste and the maximum shear strength of granular soil samples, particularly Chlef sand mixed with various contents of recycled glass waste ranging from WRG=0% to WRG=30%. The samples are prepared in the laboratory using dry pluviation preparation technique and subjected to three initial normal stresses (σ = 100 kPa, 200 kPa, and 300 kPa) and a constant relative density (D_r = 90%). The results of the direct shear tests indicate that the particle size of recycled glass waste in terms of maximum diameter (D_{\max}) significantly controls the mechanical response of Chlef sand-recycled glass waste mixtures. Increasing the maximum diameter of recycled glass waste leads to a notable improvement in the maximum shear strength and friction angle, resulting in a significant increase in the dilatancy phase, for all fractions of recycled glass waste (WRG = 0%, 10%, 20%, and 30%) studied and the three selected levels of normal stress. Furthermore, It is found that recycled glass waste is a relevant parameter for enhancing the shear strength of sandy soils, where increasing their proportion results in a systematic improvement of the mechanical behavior.

KEYWORDS: granular soil, recycled glass, Casagrande shear box, particle size, shear strength



RESUME

L'ajout de matériaux tels que les déchets de verre recyclé peuvent avoir un effet primordial sur les caractéristiques mécaniques des sols. Plus précisément, dans le domaine de la géotechnique, l'incorporation de déchets de verre recyclé dans les sols peut améliorer leurs propriétés mécaniques et géotechniques, notamment leur résistance au cisaillement. Cette approche présente également des avantages environnementaux en permettant la réutilisation de déchets de verre recyclé qui, autrement, seraient destinés aux décharges. Dans ce contexte, cette étude propose une investigation expérimentale sur l'influence de la taille des particules de déchets de verre recyclé (D_{\max} = 4.00 mm, 2.00 mm et 0.5 mm) sur la réponse mécanique des sols granulaires. De plus, un protocole expérimental sera mis en œuvre en utilisant la boîte de cisaillement de Casagrande pour comprendre le comportement de ce matériau et confirmer d'éventuelles corrélations entre la taille des particules de déchets de verre recyclé et la résistance au cisaillement maximale des échantillons de sols granulaires, en particulier le sable de Chlef mélangé avec diverses teneurs de déchets de verre recyclé allant de WRG=0% à WRG=30%. Les échantillons ont été préparés en laboratoire à l'aide de techniques de préparation à la pluviation à sec et soumis à trois contraintes normales initiales (σ = 100 kPa, 200 kPa et 300 kPa) et à une densité relative constante (D_r = 90 %). Les résultats des tests de cisaillement direct indiquent que la taille des particules des déchets de verre recyclé en termes de diamètre maximal (D_{\max}) exerce un contrôle très significatif sur la réponse mécanique des mélanges de sable de Chlef et de déchets de verre recyclé. L'augmentation du diamètre maximal des déchets de verre recyclé entraîne une amélioration notable de la résistance au cisaillement maximale et de l'angle de frottement, induisant ainsi une augmentation significative de la phase de dilatance, pour toutes les fractions de déchets de verre recyclé (WRG = 10 %, 20 % et 30 %) étudiées et les trois niveaux de contrainte normale sélectionnés. De plus, les résultats obtenus confirment que les déchets de verre recyclé sont un paramètre pertinent pour améliorer la résistance au cisaillement des sols sableux, où l'augmentation de leur proportion se traduit par une amélioration systématique du comportement mécanique.

MOTS CLES : Sol granulaire, verre concassé, boîte de Casagrande, taille des particules, résistance au cisaillement.



Liste des symboles

D_{max}	Tailles de particules de verre concassé
WRG	Teneur en déchets de verre recyclé
σ_n	Contrainte normale
D_r	Densité relative
SiO₂	Teneur élevée en silice
FWG	Verre fin
CWG	Verre grossier
RGP	Teneur en poudre de verre
Fk	Fraction de kaolin atteigne
FA	Cendres volantes
Fc	Proportions de fines peu plastiques
P'_c	Pression de confinement
ϕ	Angle de frottement interne
C	Cohésion
N	Contrainte verticale
T	Force tangentielle
A = (L-ΔL)*L	Surface corrigée
V	Vitesse de déformation
t	Temps

Liste des symboles

τ	Contrainte de cisaillement
e	Indice du vide global
e_{\max}	Indice des vides maximal
e_{\min}	Indice des vides minimal
D_{10}	Diamètre efficace ou diamètre correspondant à 10 % de tamisât
D_{30}	Diamètre correspondant à 30 % de tamisât
D_{50}	Diamètre moyen ou diamètre correspondant à 50 % de tamisât
D_{60}	Diamètre correspondant à 60 % de tamisât
C_u	Coefficient d'uniformité
V_t	Volume du moule
V_s	V_s Volume des grains solides
V_t	Volume total d'échantillon
W	Teneur en eau
W_{sol}	Masse de l'échantillon
γ_d	Poids volumique sec
γ_{sat}	Poids volumique saturé
γ_s (Gs)	Poids volumique des grains solides
τ_{pic}	Contrainte de cisaillement maximal
R^2	Coefficient de corrélation correspondant

Liste des symboles

A, B, C	Coefficient
Δh (mm)	Déplacement horizontal.
Δv (mm)	Déplacement vertical.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La géotechnique, une discipline essentielle du génie civil, se penche sur l'étude minutieuse des caractéristiques mécaniques et hydrauliques des matériaux granulaires. Son application est cruciale dans une multitude de projets de construction, tels que des bâtiments, des ponts, des tunnels, des routes et des barrages. Pour évaluer ces propriétés géotechniques, une multitude d'essais est employée, tant sur le terrain qu'en laboratoire. Ces essais comprennent notamment l'utilisation du pressiomètre pour évaluer la pression interstitielle des sols, le pénétromètre dynamique et statique pour mesurer la résistance du sol, le triaxial statique et cyclique pour étudier le comportement sous différentes contraintes, l'œdomètre pour évaluer la compression du sol et la boîte de Casagrande pour les essais de cisaillement direct. Ces méthodes permettent une analyse détaillée des propriétés des sols, fournissant des données cruciales pour la conception et la construction de structures solides et durables.

Cependant, l'intégration de matériaux innovants comme les granulats de verre concassé dans l'étude géotechnique des sols granulaires reste limitée. L'évaluation de l'impact des granulats de verre concassé sur la résistance au cisaillement des sols sableux est un sujet d'actualité crucial pour une meilleure compréhension de la réponse mécanique de ces matériaux. Notre étude se concentre spécifiquement sur l'effet de la taille des particules et de la proportion de verre concassé sur la résistance au cisaillement du sable de Chlef, en utilisant la boîte de Casagrande comme appareil d'essai. Nous avons préparé des échantillons de sable de Chlef mélangés avec différentes tailles de particules de verre concassé ($D_{\max}=4.00\text{mm}$, 2.00 mm et 0.50 mm) à des concentrations variables ($\text{WRG}=0\%$, 10% , 20% et 30%), reconstitués à une densité relative de 90% , et soumis à différentes contraintes normales ($\sigma_n=100\text{ kPa}$, 200 kPa et 300 kPa).

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres.

Le premier chapitre offre une analyse approfondie des recherches existantes concernant l'impact des granulats de verre concassé sur la réponse mécanique des sols, ainsi que l'influence de divers paramètres sur le comportement des sols granulaires.

Le deuxième chapitre détaille le dispositif expérimental utilisé dans l'étude, ainsi que la procédure spécifique de l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande. De plus, il expose la caractérisation physique des matériaux utilisés et la méthodologie de préparation des échantillons pour les divers essais mécaniques.

Le troisième chapitre présente les résultats des essais de cisaillement effectués à l'aide de la boîte de Casagrande, se concentrant sur l'influence de la taille des particules de verre concassé sur la réponse mécanique du sable de Chlef.

Enfin, le quatrième chapitre analyse en profondeur l'impact de différents paramètres, tels que la proportion de granulats de verre concassé et la contrainte normale initiale, sur le comportement mécanique des mélanges de sable et de granulats de verre concassé.

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

L'intégration de matériaux comme le déchets de verre recyclé peut jouer un rôle crucial dans les caractéristiques mécaniques des sols. Plus spécifiquement, dans le domaine de la géotechnique, l'incorporation de déchets de verre recyclé peut améliorer diverses propriétés mécaniques et géotechniques des sols, notamment leur résistance au cisaillement. Cette approche présente également des avantages environnementaux en favorisant la réutilisation des déchets de verre concassé, qui autrement seraient destinés aux décharges. Ce chapitre explore les recherches récentes visant à mieux comprendre les mécanismes fondamentaux et les effets de l'ajout de particules de déchets de verre recyclé aux sols. En outre, nous examinons l'influence de divers paramètres sur la réponse mécanique des sols.

1.2. Influence de la taille des particules et la teneur en déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols

1.2.1. Taille de particules

L'étude menée par Liu et al. (2014) a examiné l'influence de la taille des particules sur le comportement mécanique des matériaux granulaires. Ils ont comparé deux types de matériaux, à savoir des perles de verre et du sable Hostun, dans des conditions de laboratoire où les échantillons étaient reconstruits pour obtenir une densité relative similaire ($D_r=42\%$). Leurs résultats ont démontré que la taille des grains avait un effet significatif sur le coefficient d'uniformité ainsi que sur la résistance au cisaillement du matériau. De plus, ils ont observé une diminution de la résistance au cisaillement non drainé avec l'augmentation du coefficient d'uniformité du mélange, avec le coefficient " C_u " variant de 1,1 à 20, suivant une corrélation polynomiale (voir Figure 1.1).

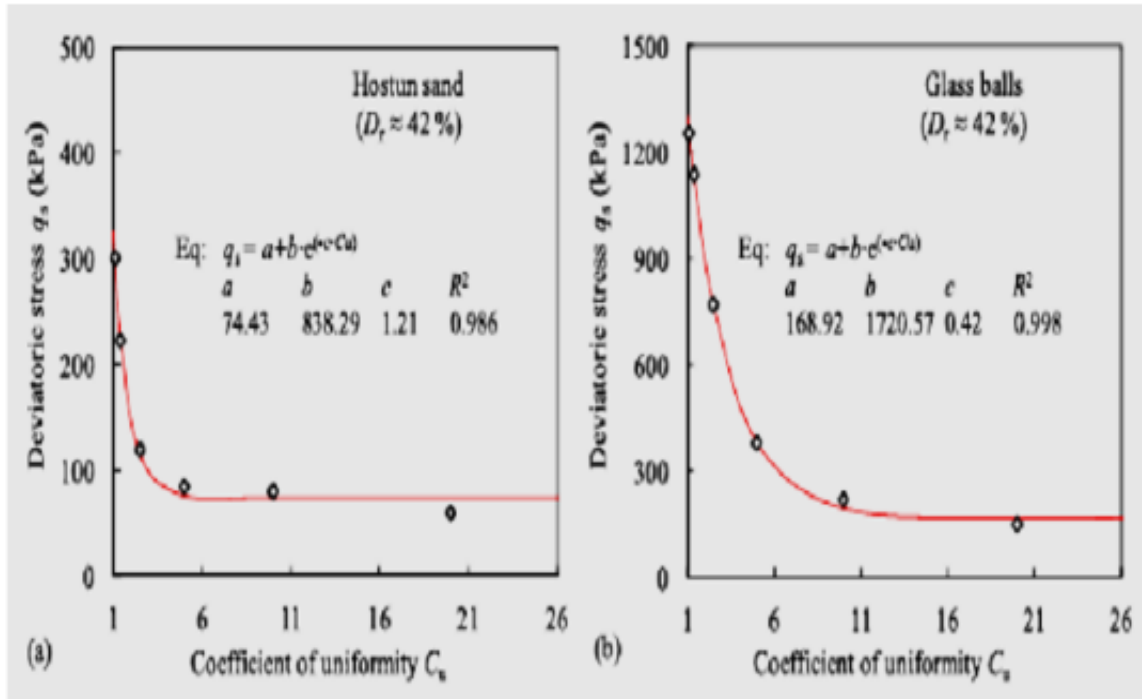


Figure 1.1: Influence de coefficient d'uniformité sur la résistance au cisaillement non drainée des matériaux granulaires, (a) sable d'Hostun (b) billes de verre (Liu et al. 2014).

Hazout (2017) a examiné les méthodes de préparation, à savoir le damage humide et la pluviation à sec, sur le sable de Chlef après des essais triaxiaux monotones. Les échantillons ont été reconstruits avec une densité relative initiale de $D_r = 25\%$ et soumis à deux contraintes limites (50 kPa et 100 kPa). Les résultats ont clairement indiqué que ce mode de préparation influençait l'écart de contrainte, la pression interstitielle de l'eau et le chemin de contrainte du sable de Chlef, avec un diamètre maximum ($D_{max} = 4,00$ mm) et un diamètre moyen ($D_{50} = 1,00$ mm). De plus, l'étude a révélé que les échantillons formés par la pluviation à sec étaient plus résistants que ceux préparés par le damage humide. L'écart de contrainte maximal a été observé dans les échantillons préparés par cette méthode, avec une valeur de $q_{max} = 185,07$ kPa par rapport à $q_{max} = 63,26$ kPa pour les échantillons soumis aux dommages humides, comme illustré dans la Figure 1.2.

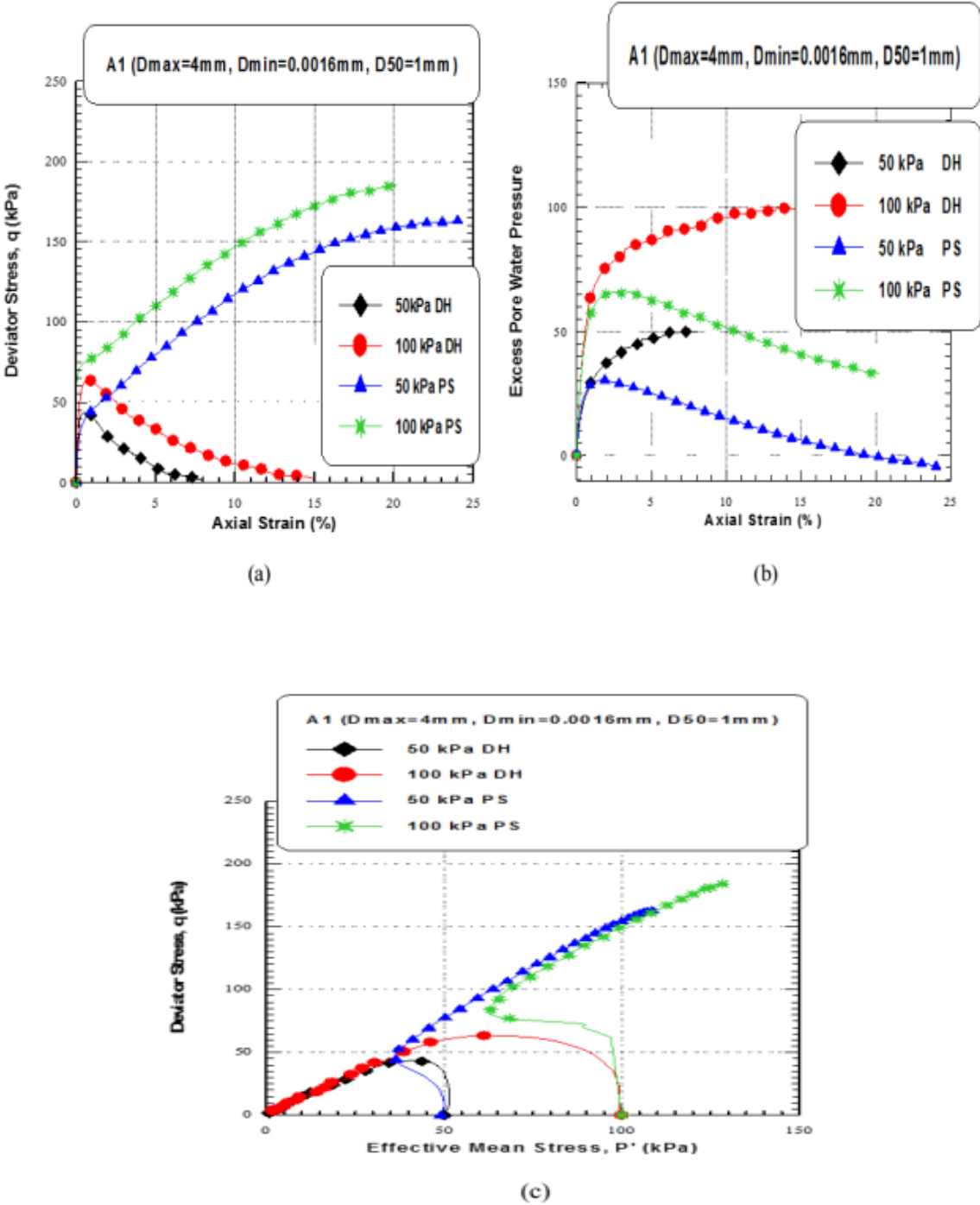


Figure 1.2 : Réponse non-drainée du sable de Chlef (a) Evolution du déviateur de contrainte (b) Evolution de la surpression interstitielle (c) Le chemin de contrainte de sable de Chlef. Hazout (2017).

Chapitre1 : Etude bibliographique

Merni et Elezaar (2019) ont entrepris une série d'essais à la boîte de cisaillement direct afin d'analyser le comportement mécanique des spécimens de sable de Chlef présentant différents diamètres maximaux ($D_{\max}=4$ mm, 2.0 mm, 0.63 mm). Ces spécimens ont été préparés en laboratoire avec deux fractions de cendres volantes (FA=0 % et 15 %) pour une densité relative lâche ($D_r=25$ %) et soumis à une contrainte normale initiale de $\sigma_n=100$ kPa. Leurs résultats ont clairement démontré que la taille des grains, exprimée en termes de diamètre maximal, exerce une influence très significative sur la résistance au cisaillement des échantillons des mélanges sable-cendres volantes. En effet, la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation du diamètre maximal ($D_{\max}=0.63$ mm, 2.0 mm, 4.0 mm) pour les deux pourcentages de cendres volantes sélectionnés (FA=0 % et 15 %), comme illustré dans les Figures 1.3 et 1.4.

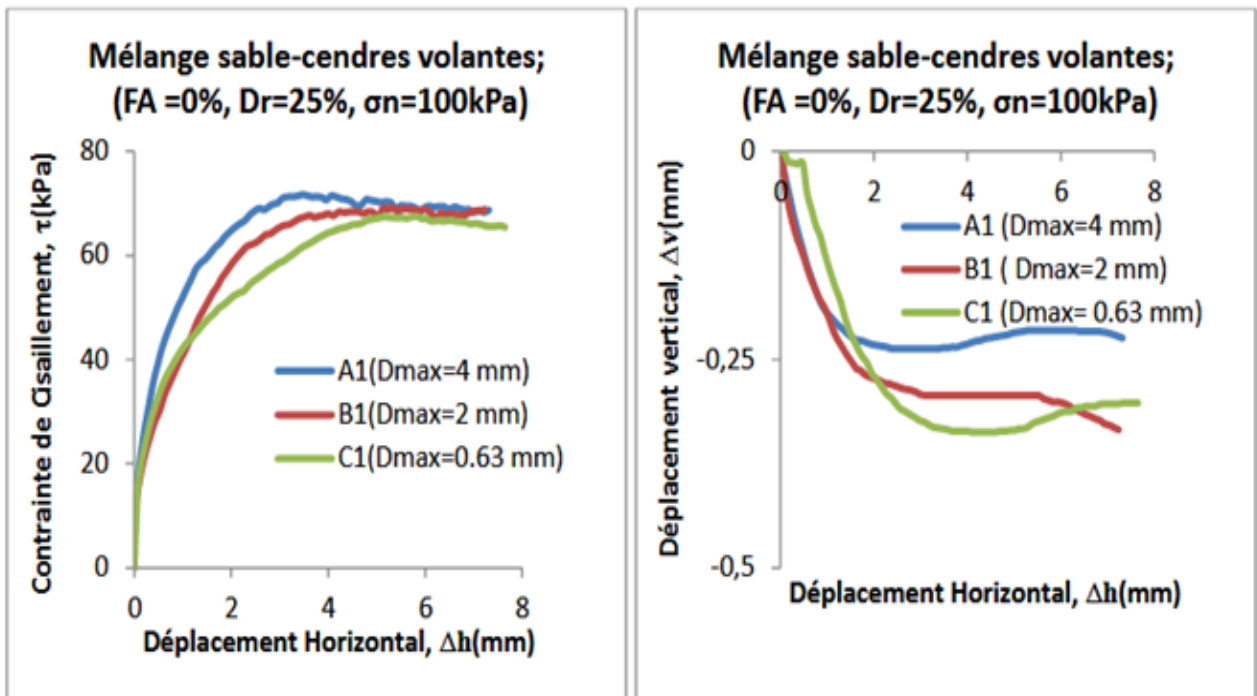


Figure 1.3 : Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-cendres volantes ($D_{\min} = 0.08$ mm, $\sigma_n=100$ kPa, $D_r=25\%$, FA=0%) (a) - Evolution de contrainte de cisaillement (b) - Evolution de déplacement vertical Merni et Elezaar. (2019).

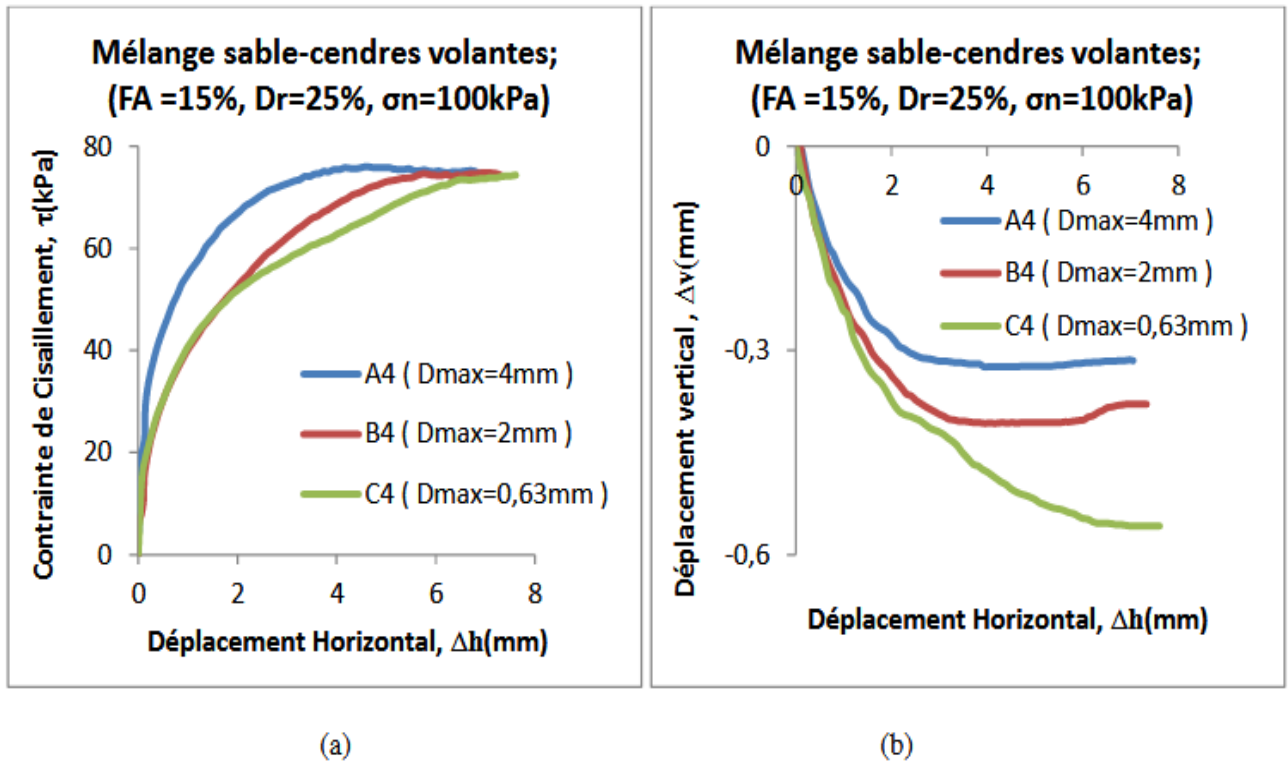


Figure 1.4: Effet de la taille des grains sur le comportement mécanique des mélanges sable-cendres volantes ($D_{min} = 0.08$ mm, $\sigma_n = 100$ kPa, $D_r = 25\%$, $FA = 15\%$) (a) - Evolution de contrainte de cisaillement (b) - Evolution de déplacement vertical Merni et Elezaar. (2019).

1.2.2. Teneur en déchets de verre recyclé

Dans leur recherche, Mohammed Ali et al. (2022) ont étudié l'effet de différentes quantités de poudre de verre recyclé sur la résistance à la compression non confinée d'un sol stabilisé par des géopolymères pendant une période de 7 jours. La Figure 1.5 révèle que la résistance à la compression non confinée a augmenté de manière linéaire jusqu'à atteindre une valeur optimale de 15 % de poudre de verre recyclé. Au-delà de ce seuil, la résistance a commencé à décroître. Ces résultats suggèrent qu'une concentration accrue de poudre de verre conduit à un excès de matériau qui ne réagit pas avec l'activateur et reste présent dans l'échantillon. Étant donné que la poudre de verre est constituée de particules très fines avec une faible adhérence, l'addition d'une quantité excessive de ce matériau au sol aura pour effet de réduire sa résistance.

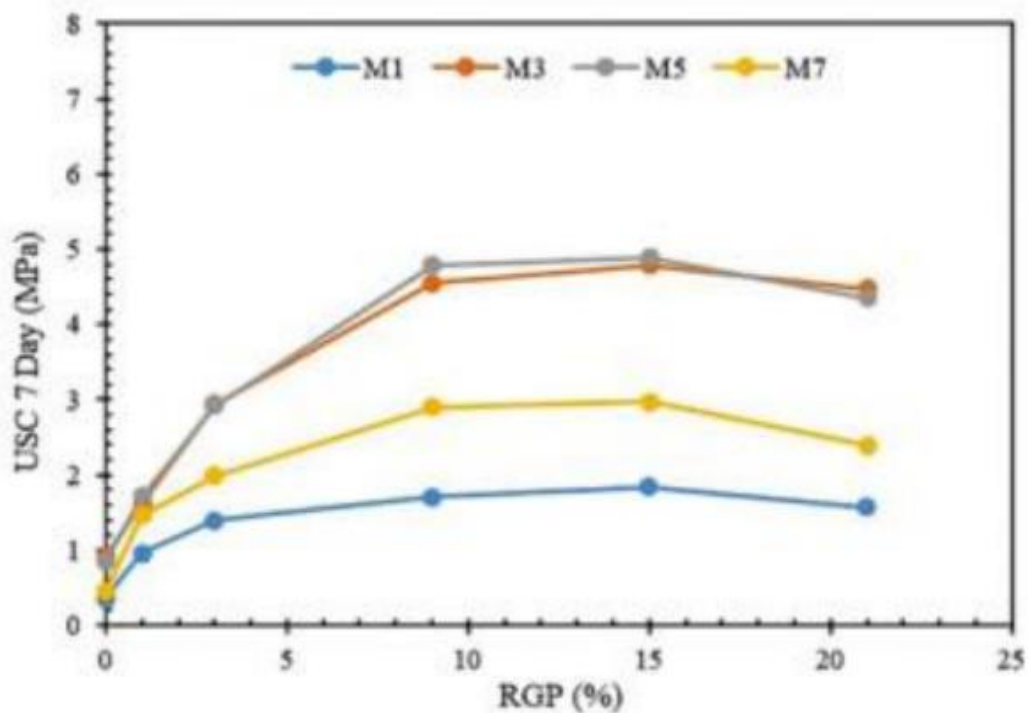


Figure 1.5 : Résistance non confinée pendant 7 jours en fonction de poudre de verre (Mohammed Ali et al 2022).

Blayia et al. (2020) ont mis en évidence les avantages de l'incorporation de poudre de verre recyclé pour renforcer la résistance des sols expansifs. Leur recherche a porté sur des mélanges d'argile et de poudre de verre recyclé, et la Figure 1.6 (a) illustre la corrélation entre l'angle de frottement interne (ϕ) et l'ajout de poudre de verre recyclé dans le sol expansif. Leurs résultats ont indiqué qu'avec l'ajout de 25 % de poudre de verre recyclé, l'angle de frottement interne a augmenté d'environ 61 % (passant de 19,80 à 31,87) dans le sol expansif. Cette amélioration est attribuée à l'augmentation de la densité maximale sèche, ce qui réduit l'indice de vide entre les particules du mélange. La Figure 1.6 (b) présente également la relation entre la cohésion et le pourcentage d'ajout de poudre de verre recyclé dans le sol expansif. Après l'ajout de 25 % de poudre de verre recyclé, la cohésion de l'échantillon de sol a diminué de 19,04 % (passant de 39,13 kPa à 31,68 kPa). Ceci est dû au fait que la poudre de verre, par sa nature, est moins cohésive que les déchets de sol avec une teneur élevée en silice ($\text{SiO}_2 = 71,21 \%$).

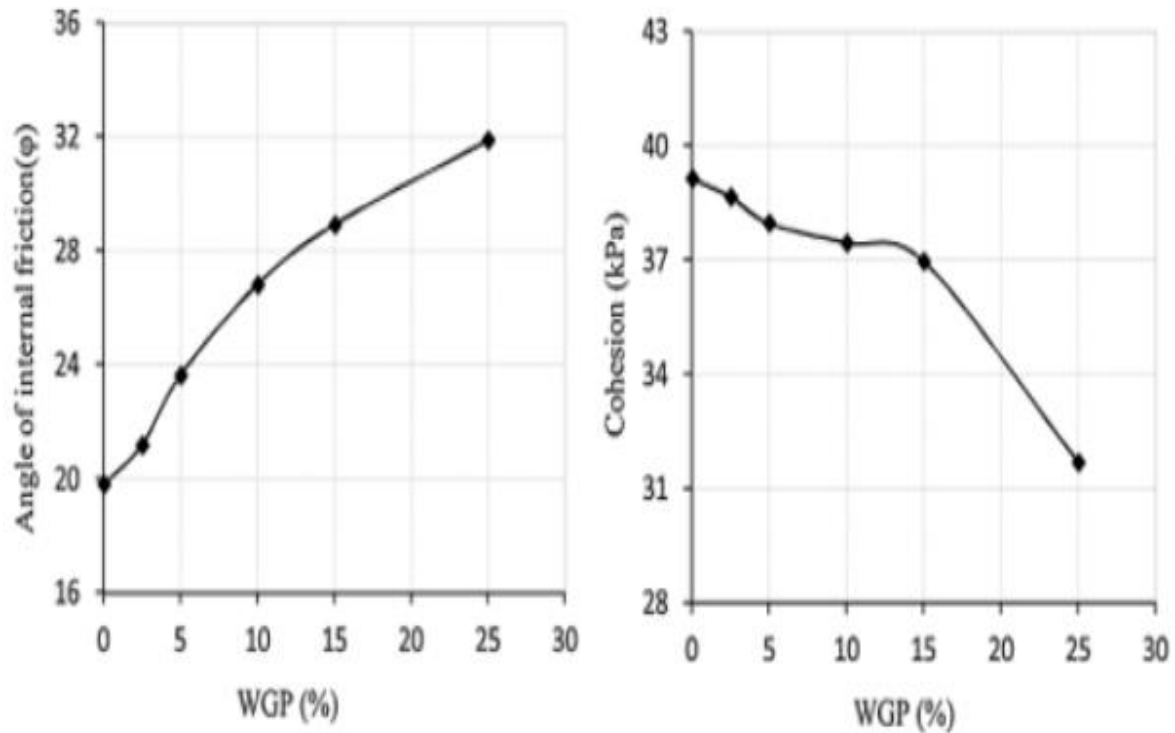


Figure 1.6 : (a) Relation entre (φ) et WGP. (b) Relations entre cohésion et WGP (Blayi et al 2020).

Cabalar et al. (2020) ont mené une étude sur les propriétés géotechniques de la bentonite traitée avec des particules de verre recyclé. Deux tailles différentes de déchets de verre ont été utilisées dans cette étude expérimentale : le verre fin (FWG) et le verre grossier (CWG), ajoutés à des échantillons de bentonite. Les caractéristiques de compactage des échantillons contenant les deux tailles de granulés de verre recyclé ont été représentées dans le Graphique 1.5. Les résultats indiquent que les échantillons contenant des déchets de verre grossiers ont présenté une densité sèche maximale ($\gamma_{d_{max}}$) et une valeur d'humidité optimale (ω_{opt}) plus élevées que ceux contenant des déchets de verre fins. Par exemple, pour une proportion de 30 % de déchets de verre fin, les valeurs de $\gamma_{d_{max}}$ et ω_{opt} sont respectivement de 14,24 kN/m³ et 18,58 %, tandis que pour une proportion similaire de déchets de verre grossiers, les valeurs correspondantes sont de 14,94 kN/m³ et 17,88 %. Cette disparité peut s'expliquer par le fait que la quantité de particules d'argile remplissant les vides dans les échantillons de déchets de verre grossiers était supérieure à celle présente dans les échantillons de déchets de verre fins.

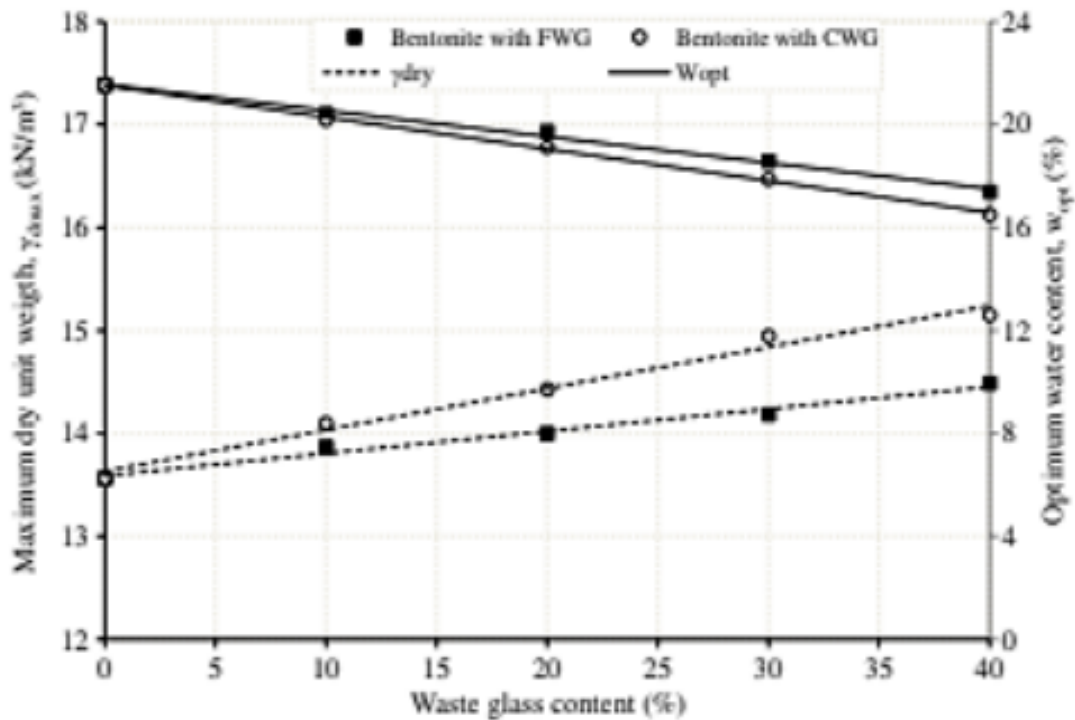


Figure 1.7 : Variation du γ_{dmax} et de w_{opt} en fonction de déchets de verre (Cabalar et al 2020).

Zitoufi et Lourri (2023) ont analysé l'impact de la teneur en poudre de verre (RGP=0 %, 10 %, 20 % et 40 %) sur les performances mécaniques du sable et du sol. Des échantillons de mélanges de poudre de verre et de sable ont été préparés en utilisant la méthode de la pluviation à sec (PS), avec une densité relative initiale de ($D_r=20$ %), puis soumis à trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100$ kPa, 200 kPa et 300 kPa). Leurs résultats ont montré que la teneur en poudre de verre a un impact significatif sur les propriétés mécaniques des mélanges de poudre de verre et de sable pour tous les paramètres étudiés. De plus, une augmentation de la teneur en poudre de verre entraîne une diminution de la résistance au cisaillement, avec des valeurs de τ_{max} respectivement de 77,56 kPa, 71,69 kPa, 62,31 kPa et 61,94 kPa pour RGP de 0 %, 10 %, 20 % et 40 % ($D_r=20$ %) et trois contraintes normales initiales ($\sigma_n=100$ kPa, 200 kPa et 300 kPa). Cette tendance à la baisse de la résistance au cisaillement peut s'expliquer par le fait que les particules de poudre de verre agissent comme des espaces entre les grains de sable, réduisant ainsi l'enchevêtrement des particules et la résistance au cisaillement du mélange de poudre de verre et de sable. La Figure 1.8 met en évidence l'effet significatif de la poudre de verre sur le comportement mécanique du sable. Les résultats obtenus ont confirmé que la fraction de poudre de verre (RGP=0 %, 10 %, 20 %, 40 %) joue un rôle important dans l'expansion, car la dilatation augmente avec la quantité

de poudre de verre ajoutée. De plus, une augmentation de la fraction de poudre de verre entraîne une réduction de la phase de dilatance, ce qui est associé à une résistance réduite.

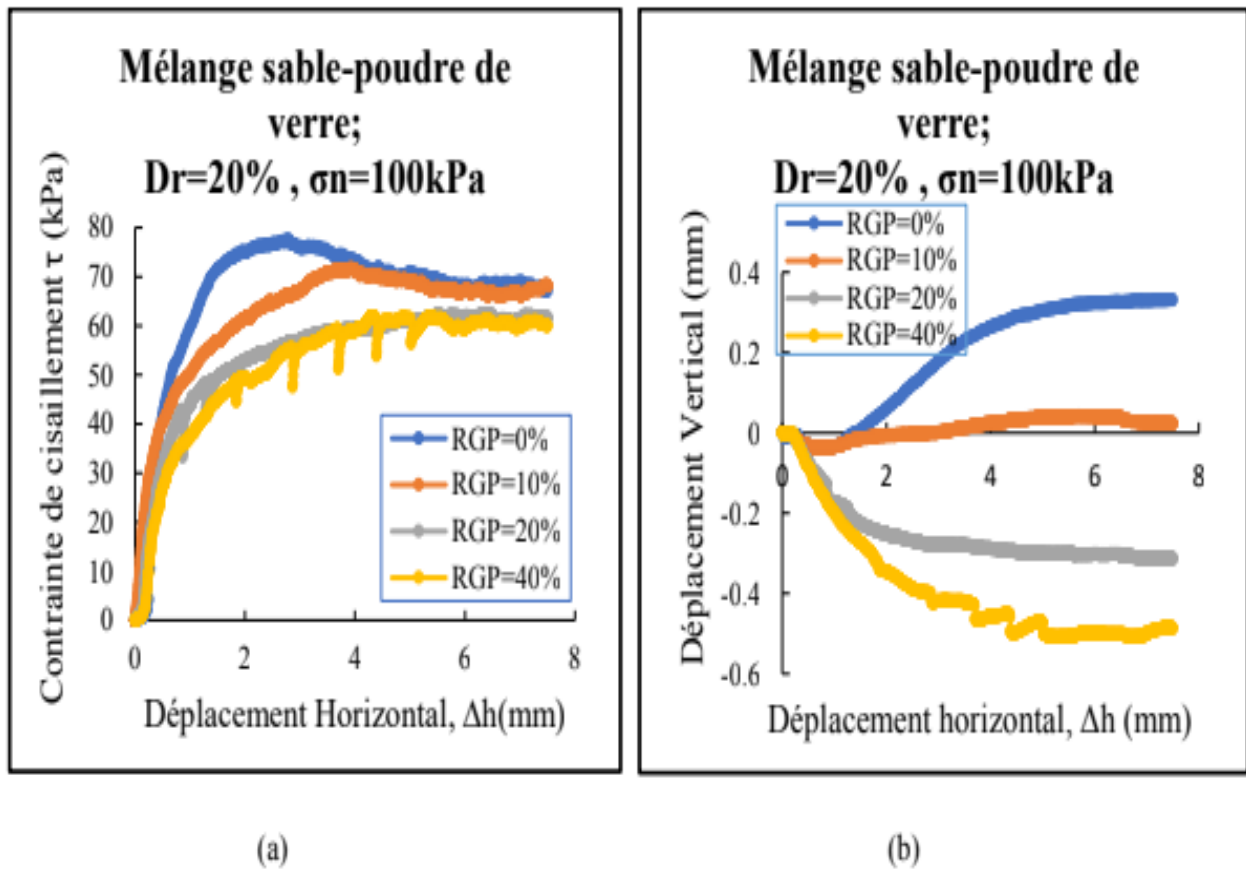


Figure 1.8 : Effet de la fraction de poudre de verre sur le comportement mécanique

($\sigma_n = 100 \text{ kPa}$, $D_r = 20\%$) (a) - Evolution de contrainte de cisaillement (b) - Evolution de déplacement vertical (Zitoufi et Louri 2023)

1.3. Effet des quelques facteurs sur la réponse mécanique des sols

1.3.1. Teneur en Kaolin

Bayat et al. (2012) ont conduit des essais à l'appareil triaxial sur des spécimens du mélange sable-kaolin, avec une fraction variant de $F_k=0\%$ à $F_k=30\%$. Leurs résultats ont révélé qu'une augmentation de la fraction de kaolin jusqu'à 20% entraîne une diminution de la résistance maximale au cisaillement des mélanges sable-kaolin. Au-delà de cette valeur, la résistance au cisaillement maximale augmente avec l'augmentation du pourcentage de bentonite. En outre, ils ont conclu que la proportion de kaolin a une influence très significative sur la pression interstitielle des mélanges sable-kaolin pour la contrainte de confinement considérée, comme indiqué dans la Figure 1.9.

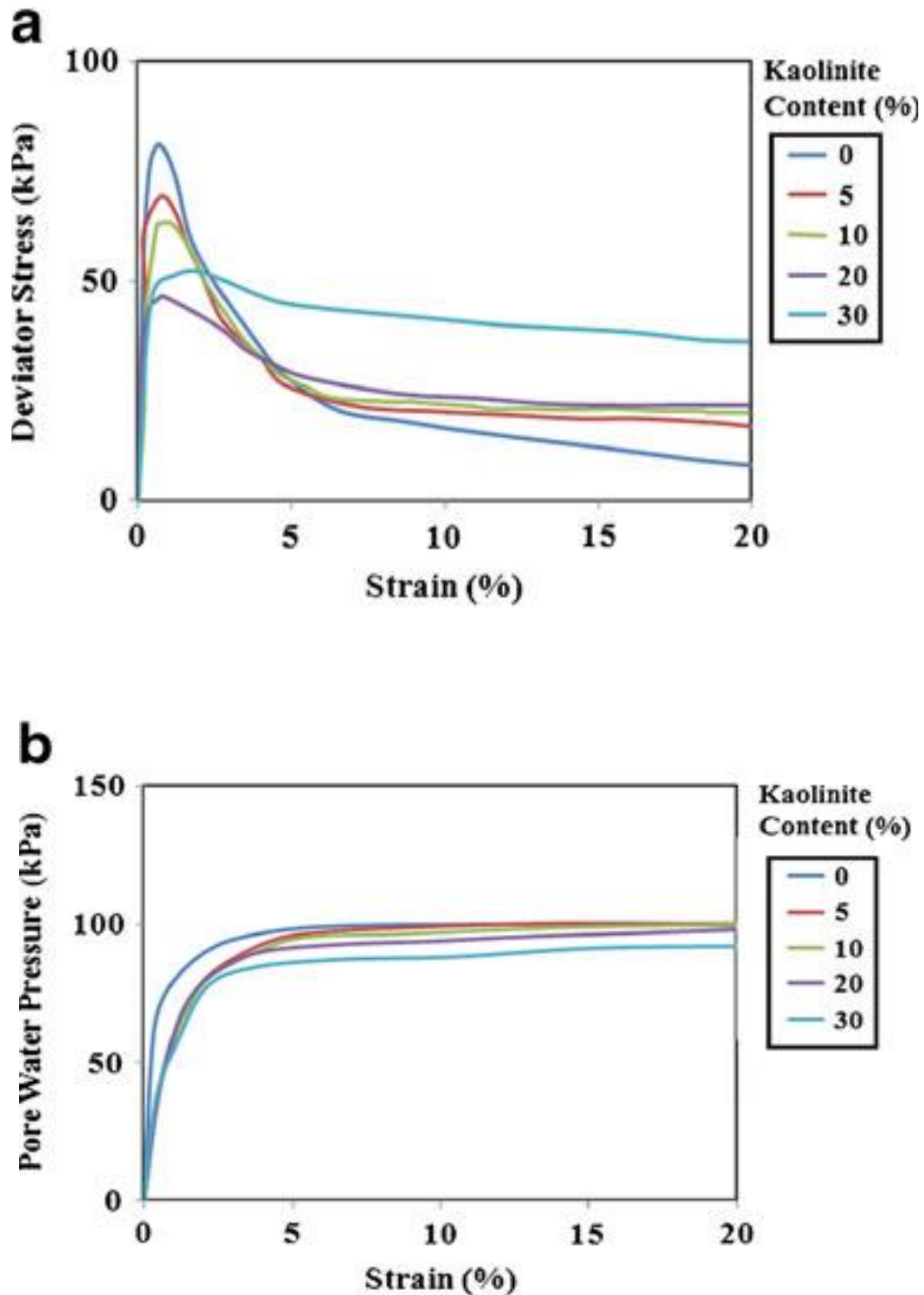


Figure 1.9: Comportement mécanique des échantillons de mélange sable-kaolinite à pression de confinement de 100 kPa. (a) Evolution du déviateur de contrainte (b) Evolution de la pression interstitielle Bayat et al. (2012)

Bouchibane et Ben Abdel-Mouttaleb (2020) ont entrepris des essais de cisaillement direct dans le but d'analyser l'impact de la fraction de kaolin sur le comportement mécanique d'un sol

Chapitre1 : Etude bibliographique

sableux. Leurs échantillons, préparés avec différentes fractions de kaolin ($F_k=0\%$, 5% , 10% , 20% et 30%) et une densité relative initiale ($D_r=55\%$), ont été soumis à une contrainte initiale normale ($\sigma_n=100\text{ kPa}$). Leurs résultats ont révélé que la fraction de kaolin exerce une influence notable sur la résistance au cisaillement des mélanges sable-kaolin. En augmentant la fraction de kaolin, la résistance au cisaillement diminue, par exemple, de $\tau=75.1\text{ kPa}$ pour $F_k=0\%$ à $\tau=60.7\text{ kPa}$ pour $F_k=10\%$. Ensuite, cette résistance continue de décroître jusqu'à ce que la fraction de kaolin atteigne $F_k=20\%$. Au-delà de cette valeur, la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation du pourcentage de kaolin pour les sols étudiés, comme illustré dans la Figure 1.10.

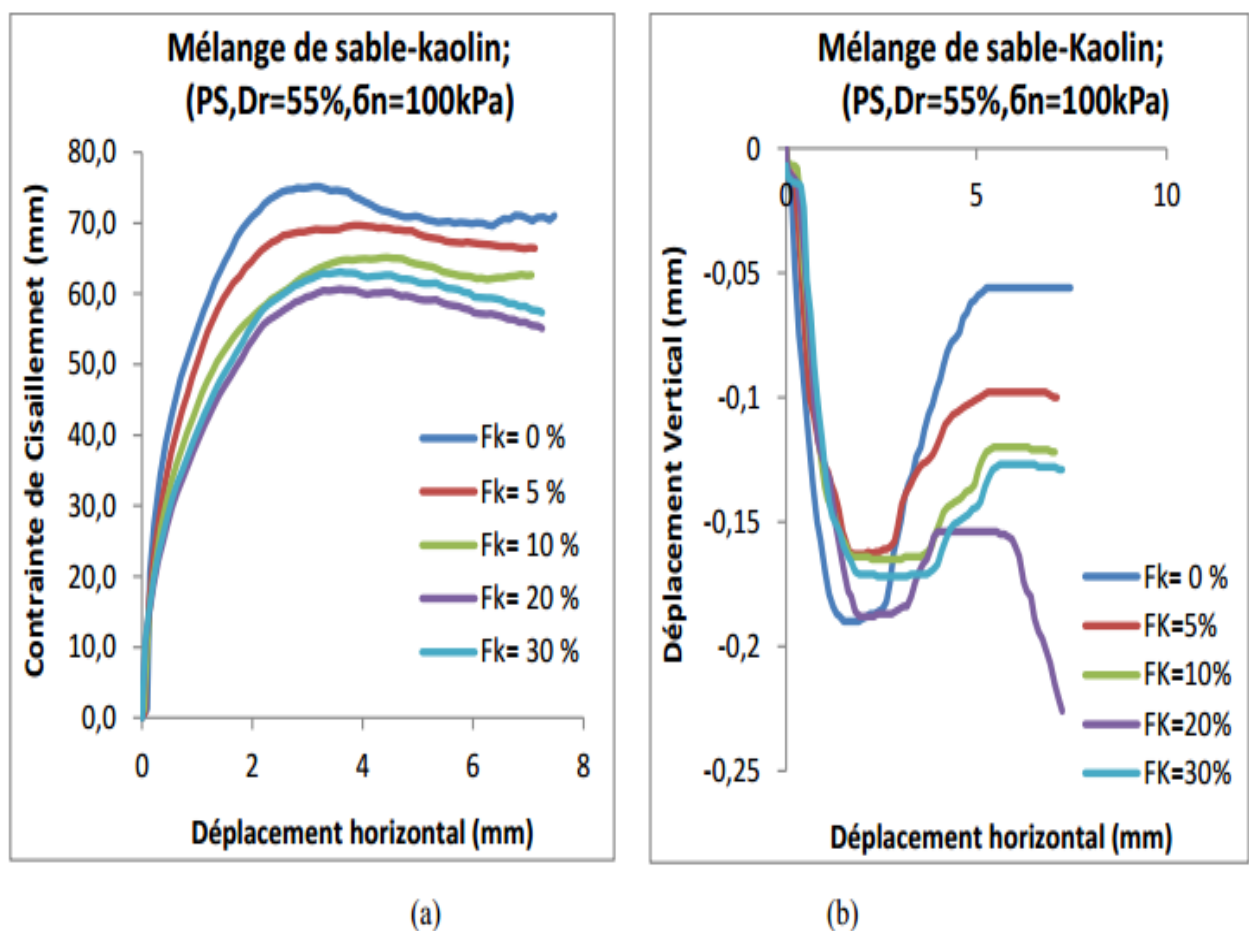


Figure 1.10 : Effet de la fraction de kaolin sur le comportement mécanique de sable de Chlef
Bouchibane, Ben Abdel-Mouttaleb (2020)

1.3.2. Teneur en cendres volantes

Chapitre1 : Etude bibliographique

Kermatikerman et al. (2018) ont effectué des essais monotones à l'aide de l'appareil triaxial sur des spécimens de sable mélangés en laboratoire avec différentes fractions de cendres volantes (FA=0 %, 2 %, 4 % et 6 %) à une densité relative initiale lâche ($D_r=20\%$) et soumis à une pression de confinement initiale ($P'_c=50$ kPa). Leurs résultats ont révélé que l'ajout de cendres volantes dans les spécimens a complètement modifié la réponse contrainte-déformation du sol. De plus, ils ont démontré que les cendres volantes jouent un rôle essentiel dans l'augmentation de la résistance au cisaillement non drainée des sables. En effet, ils ont prouvé que la résistance au cisaillement non drainée augmente avec l'augmentation du pourcentage de cendres volantes (FA=0 % à 6 %) dans les mélanges sable-cendres volantes. Ils ont expliqué cette augmentation de résistance par le fait que les cendres volantes contribuent à renforcer les forces inter-particulaires entre les grosses particules des sables, comme le montre la Figure 1.11.

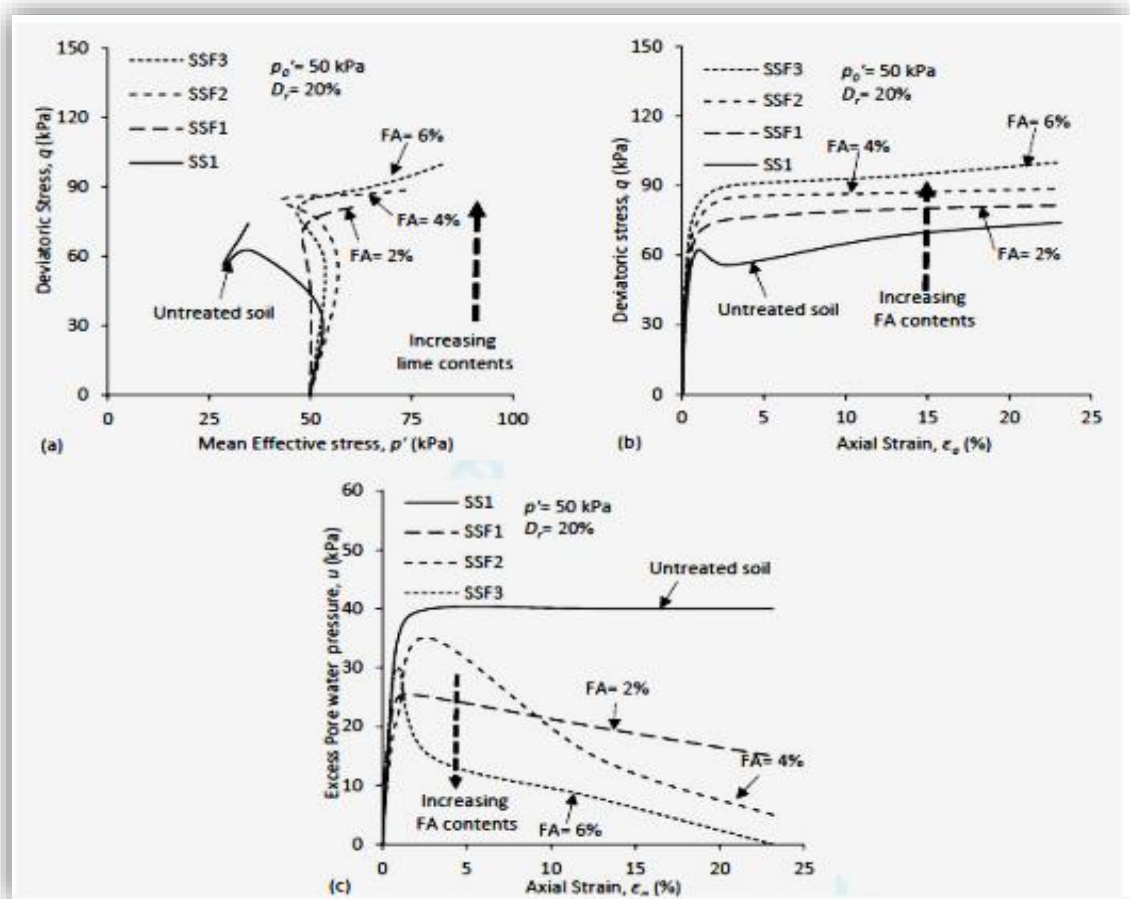


Figure 1.11: Influence de teneur en cendres volantes sur la résistance au cisaillement non drainée de sols granulaires Kermatikerman et al. (2018)

Bouchibane et Ben Abdel-Mouttaleb (2020) ont exploré l'impact du pourcentage de cendres volantes (FA=0 %, 5 %, 10 %, 20 % et 30 %) sur le comportement mécanique des sols

Chapitre1 : Etude bibliographique

granulaires. Leurs échantillons, préparés en laboratoire avec une densité relative ($D_r=55\%$), ont été soumis à une contrainte normale de 100 kPa. Leur étude a révélé que la fraction de cendres volantes exerce un effet notable sur le comportement mécanique des mélanges sable-cendres volantes. De plus, elles ont observé que la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation du pourcentage de cendres volantes. Elles ont expliqué cette tendance en soulignant que les particules de cendres volantes contribuent à renforcer l'enchevêtrement entre les grosses particules de sable, ce qui accroît la phase de dilatance des mélanges. Cela conduit à une structure plus stable et moins compressible, entraînant ainsi une augmentation très significative de la résistance au cisaillement. Par ailleurs, elles ont remarqué que l'augmentation du pourcentage de cendres volantes entraîne également une augmentation de la phase de dilatance des mélanges étudiés, comme illustré dans la Figure 1.12.

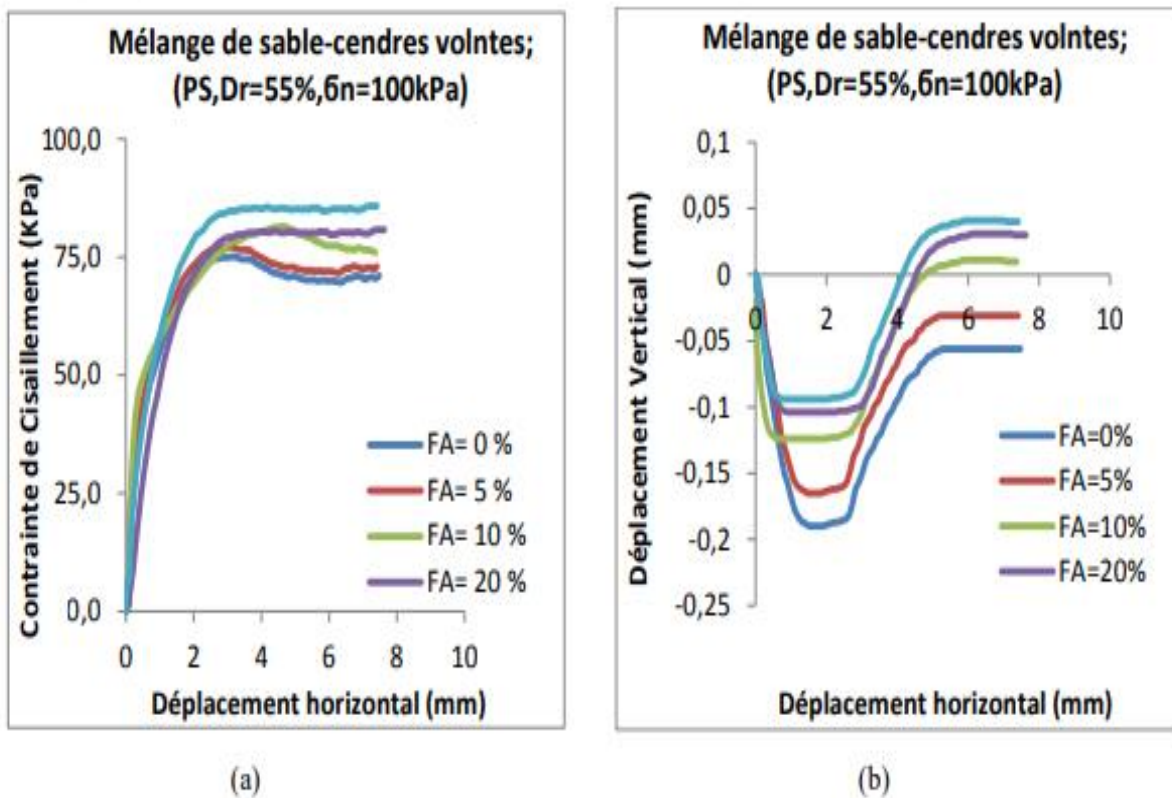


Figure 1.12: Effet de la fraction de cendres volantes sur le comportement mécanique ($\sigma_n=100$ kPa, $D_r=55\%$)

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

Bouchibane et Ben Abdel-Mouttaleb (2020)

1.3.3 Forme des grains

Cherif Taiba et al. (2018) ont mené des essais triaxiaux non drainés en compression monotone dans le but d'explorer la relation entre les caractéristiques de forme des grains, telles que la sphéricité et l'angularité. Leurs échantillons, constitués de mélanges de sable avec différentes proportions de fines peu plastiques ($F_c=0\%$ à $F_c=40\%$), ont été préparés en laboratoire en utilisant trois types de sables aux formes de grains variées (sable de Chlef « arrondi », sable de Fontainebleau « semi-arrondi » et sable d'Hostun « semi-anguleux »). Ces mélanges ont ensuite été soumis à une pression de confinement ($P'_c=100$ kPa). Leurs résultats ont révélé que la forme des particules exerce un effet significatif sur le comportement mécanique, en particulier sur la résistance au cisaillement non drainée, des sables étudiés, à une densité relative initiale de 52 %. De plus, ils ont observé que la diminution de la résistance au cisaillement non drainée est associée à une réduction de la sphéricité combinée et à une augmentation de l'angularité combinée pour les mélanges sable-limoneux. Ils ont également conclu que les caractéristiques de forme des grains, telles que la sphéricité et l'angularité, jouent un rôle crucial dans la variation de la résistance au cisaillement non drainée des sols étudiés, comme le montre la Figure 1.13.

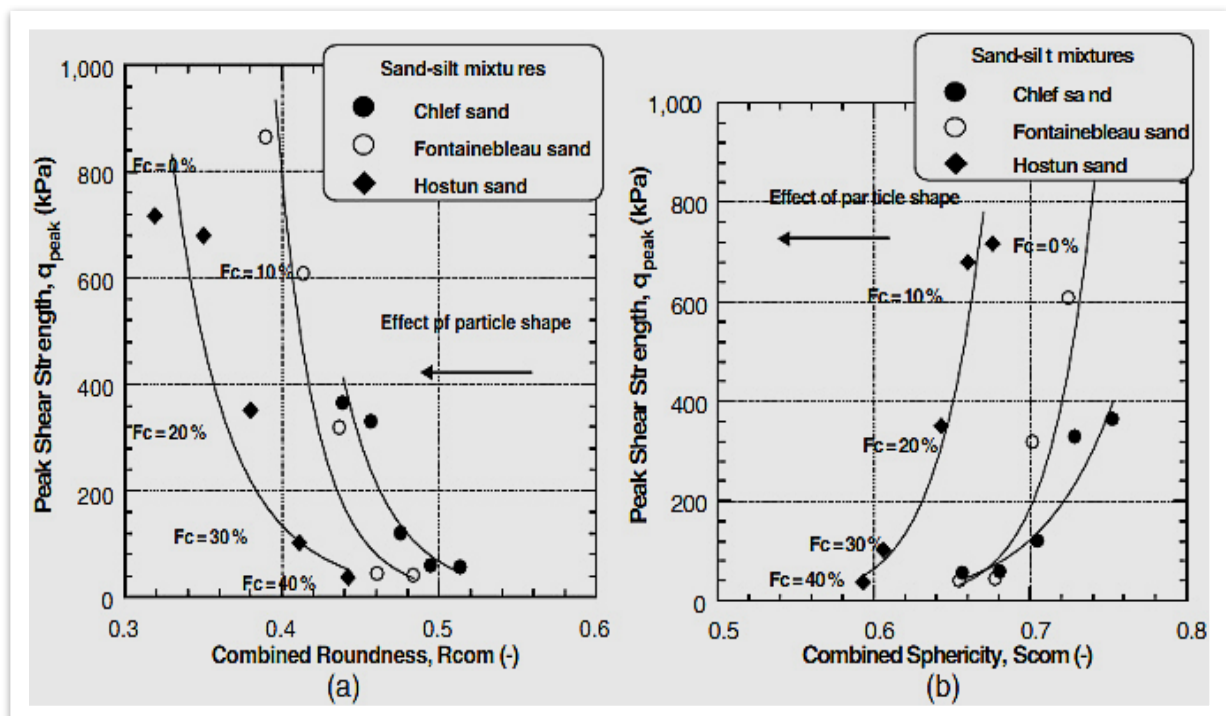


Figure 1.13 : Résistance au cisaillement non drainé au pic versus les caractéristiques de forme des grains

Cherif Taiba et al (2018).

1.4. Conclusion

Le domaine du génie géotechnique se penche de plus en plus sur l'étude du comportement mécanique du sable mélangé à des particules de déchets de verre recyclé en raison de son impact sur l'instabilité, l'effondrement et la résistance des sols granulaires. Cette revue de littérature présente les résultats de plusieurs études parues dans des revues internationales sur les effets de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur le comportement des sols. De plus, ce chapitre met en lumière les principales recherches menées sur la réponse mécanique des sols. De nombreux facteurs, tels que le taux de sur consolidation, la présence de fines, la conductivité hydraulique et la méthode de compactage, exercent une influence significative sur la résistance au cisaillement des sols. Afin de mieux appréhender le comportement mécanique du mélange sable de Chlef et particules de verre concassé (déchets de verre recyclé), il est essentiel de mener des analyses expérimentales en laboratoire afin d'évaluer l'impact de cette dernière sur la réponse mécanique du sol. La section suivante présente les résultats d'essais de cisaillement direct effectués à l'aide de boîtes de cisaillement, visant à prédire l'effet de la taille des particules de verre concassé sur le comportement mécanique des sols granulaires, et à confirmer l'hypothèse selon laquelle des analyses expérimentales en laboratoire, utilisant la boîte de cisaillement Casa Casagrande, sont nécessaires pour évaluer l'impact de différents mélanges de taille de particules de déchets de verre recyclé dans le sable sur la résistance au cisaillement des sols granulaires.

CHAPITRE II

DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET

PROCEDURE DE L'ESSAI

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons en détail le dispositif expérimental que nous avons utilisé dans notre étude, ainsi que les procédures de d'essai utilisant l'appareil de cisaillement Casagrande. Nous décrivons également les propriétés physiques du matériau testé, constitué d'un mélange de terre granulaire et de taille des particules de déchets de verre recyclé. Enfin, nous expliquerons les procédures suivies pour reconstituer et préparer les échantillons afin de réaliser différents d'essai de cisaillement direct.

2.2. Dispositif expérimental

2.2.1 Introduction

Plusieurs types d'essais en laboratoire peuvent être réalisés pour étudier la réponse mécanique des sols granulaires. Ces essais sont effectués sur des mélanges de sable contenant différents pourcentages de taille des particules de déchets de verre recyclé à l'aide d'instruments et d'équipements spécialisés, tels qu'un appareil de cisaillement direct "boite de Casagrande", comme le montre la figure 2.1.



Figure 2.1 : Appareil de cisaillement utilisé dans cette étude.

2.2.2 Objectif du l'essai

L'objectif principal de cet essai est d'évaluer les propriétés mécaniques du sol en réalisant 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. Nous avons utilisé cette approche pour étudier l'influence des propriétés des mélanges de taille des particules de déchets de verre recyclé et sablé de Chlef sur leur réponse mécanique. Cette méthode permet d'obtenir la courbe intrinsèque du sol étudié et de déterminer son angle de frottement interne ϕ et sa cohésion C .

2.2.3 Instruments

Le dispositif « boîte de cisaillement » est constitué des éléments de base suivants :

a) Pierre poreuse : utilisée pour le drainage de l'échantillon afin d'assurer une bonne adhérence entre l'échantillon et les demi-boîtes.

b) Demi-boîte supérieure : composée d'un cadre et d'un piston, supporte uniquement la charge verticale N sur l'échantillon.

c) Demi-boîte inférieure : fixée lors de l'essai de cisaillement direct.

d) Dispositif de contrôle des contraintes : entraîner la moitié inférieure de la boîte à vitesse constante, mesurer la contrainte de cisaillement τ et réaliser le Figure (2.2) à travers le dynamomètre.



Figure 2.2: Les accessoires de la boîte de cisaillement

2.2.4. Principe de fonctionnement

Pour évaluer les propriétés mécaniques des sols, l'essai de cisaillement en boîte Casagrande est couramment utilisé. Il s'agit 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 :

a) Calculez la surface initiale de la boîte égale à : **$6 \times 6 = 36 \text{ cm}^2$** .

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

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

c) Comme pour les sols pulvérulents, la vitesse de déformation appliquée a été fixée tout au long de l'essai : **1 mm/min**.

d) **T** = lecture de comparateur et ont convertie dans un tableau qui correspond d'après la fiche technique de l'appareil de cisaillement ;

e) 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** » **$\tau = T / A_{\text{corrigée}}$** .

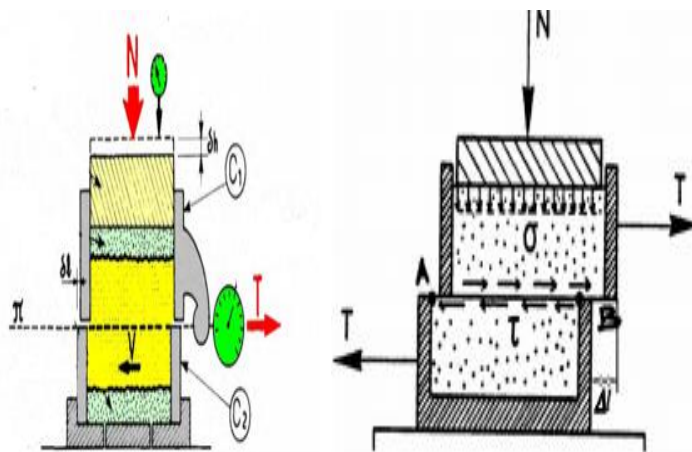


Figure 2.3 : Plan de la contrainte normale (N) et tangentielle (T).

2.2.5 Détermination des propriétés intrinsèques du sol

En effectuant plusieurs essais de cisaillement avec différentes contraintes normales et tangentielles, la courbe inhérente de l'échantillon de sol peut être déterminée et la courbe Coulomb ou Mohr-Coulomb peut être tracée. Cette courbe définit les valeurs de cohésion c et d'angle de frottement ϕ , comme le montre la figure 2.4. La répétabilité des essais de cisaillement est très importante pour obtenir des résultats fiables.

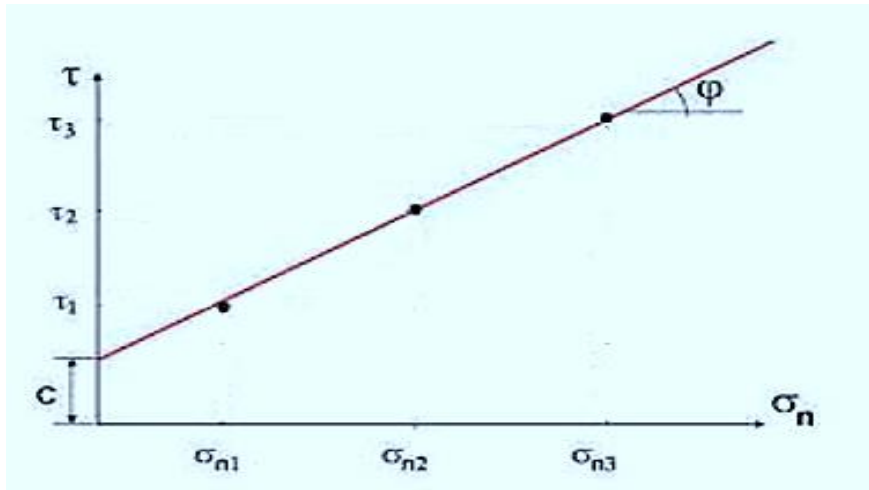


Figure 2.4 : La courbe intrinsèque des sols.

2.3. Matériaux utilisés

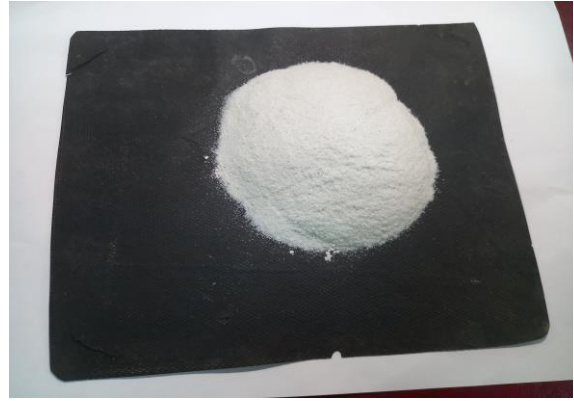
Les matériaux utilisés dans cette étude sont basés sur des mélanges de sol granulaire « $D_{\max}=2,00$ mm » avec une de taille des particules de déchets de verre recyclé ($D_{\max}=4,00$ mm 2,00 mm 0,50 mm) comprise dans la gamme (WRG=0%, 10%, 20% et 30%). Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont présentés dans la figure (2.5). Le tableau (2.1) montre la composition chimique de taille des particules de déchets de verre recyclé. Les propriétés physiques des matériaux étudiés sont présentées dans le tableau (2.2). La courbe granulométrique de l'échantillon testé est présentée sur la figure (2.6). (Figure 2.7) montre l'indice de vide maximum (« e_{\max} » correspondant à l'état le plus lâche) et l'indice de vide minimum (« e_{\min} » correspondant à l'état le plus dense de l'échantillon) en fonction de la fraction de taille des particules de déchets de verre recyclé. Selon la figure, l'indice de vide (e_{\max} et e_{\min}) diminuent avec l'augmentation de la fraction des tailles des particules de déchets de verre recyclé jusqu'à un seuil de (WRG=10%) dans la classe $D_{\max}=0.5$ mm 2,00 mm, et après ce seuil la tendance inverse a été observée) mais dans la classe $D_{\max}=4.00$ mm l'indice de vide (e_{\max} et

Chapitre 02 : Dispositif expérimental et procédure de l'essai

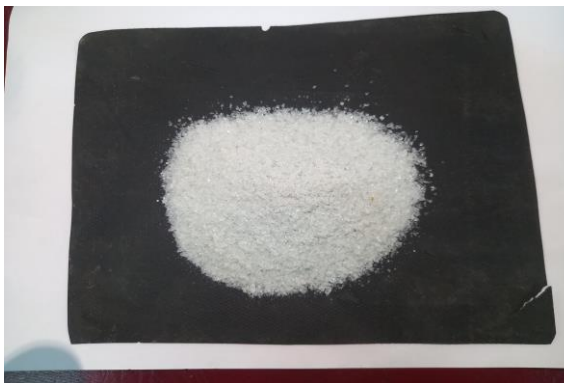
e_{min}) diminuent continue. Cette augmentation pourrait être expliquée par le fait que les taille des particules de déchets de verre recyclé dans la classe $D_{max}=0.5 \text{ mm}$ $2,00 \text{ mm}$, qui contribuent dans l'augmentation des indices des vides des mélanges sable- taille des particules de déchets de verre recyclé.



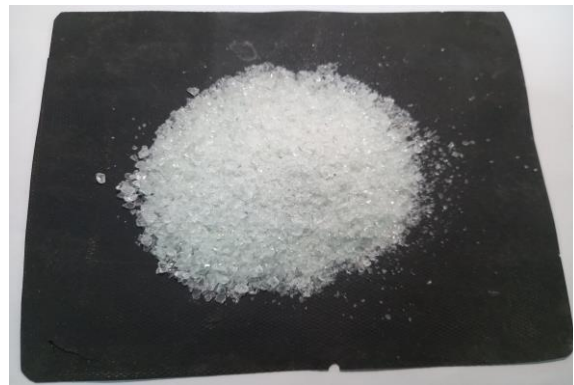
Sable de Chlef : $2 \rightarrow 0.08 \text{ mm}$



Verre classe : $0.5 \rightarrow 0.08 \text{ mm}$



Verre classe : $2 \rightarrow 0.08 \text{ mm}$



Verre classe : $4 \rightarrow 0.08 \text{ mm}$



Mélange sable + déchets de verre recyclé

Figure 2.5 : Les matériaux utilisées : Sable de Chlef, Mélange sable + déchets de verre recyclé

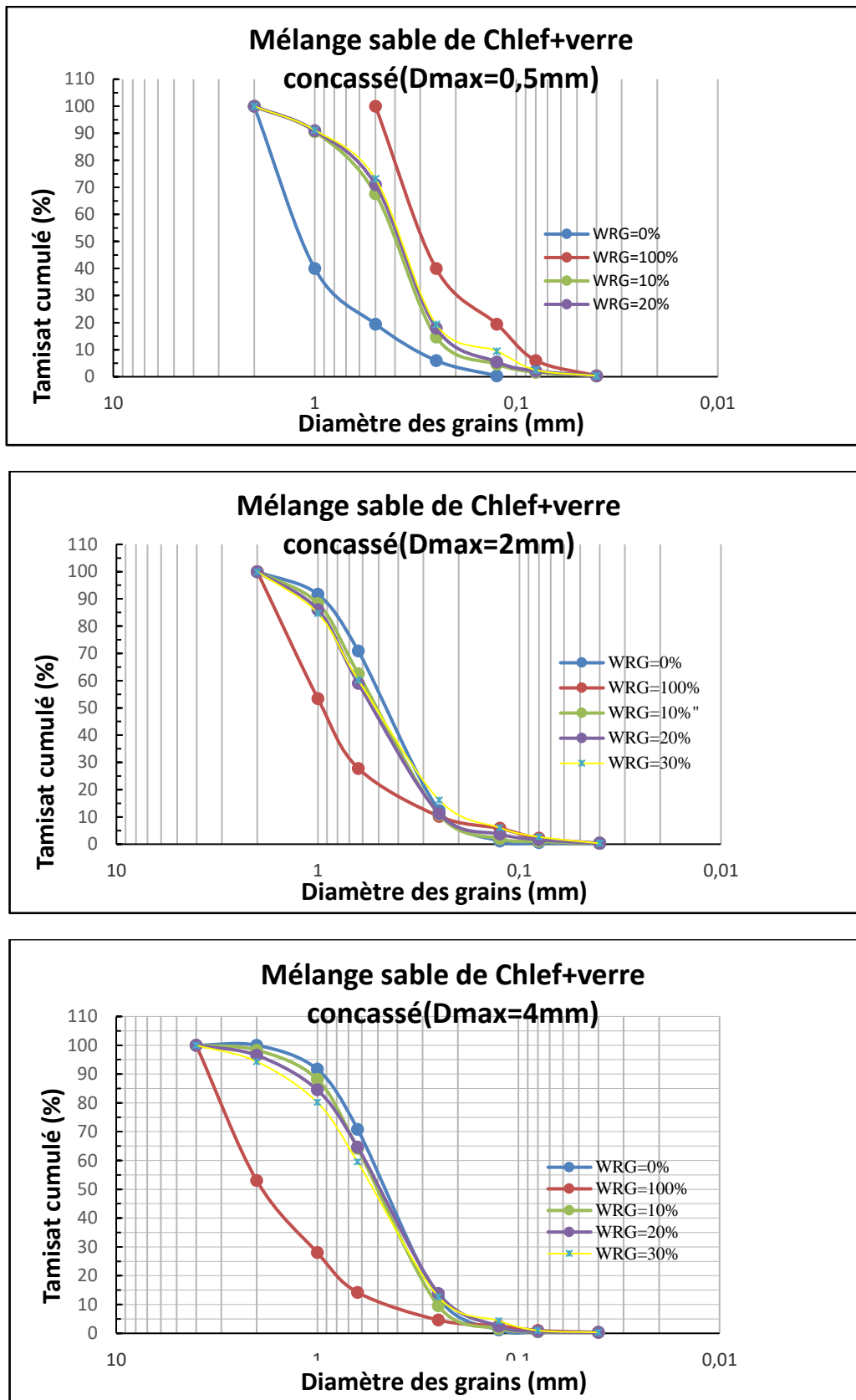


Figure 2.6 : Courbes granulométriques des matériaux étudiés.

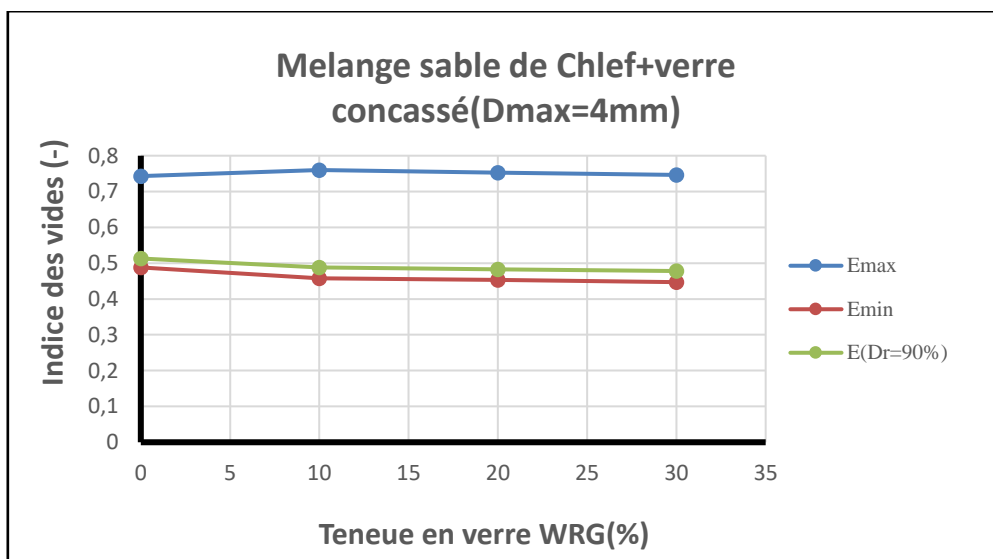
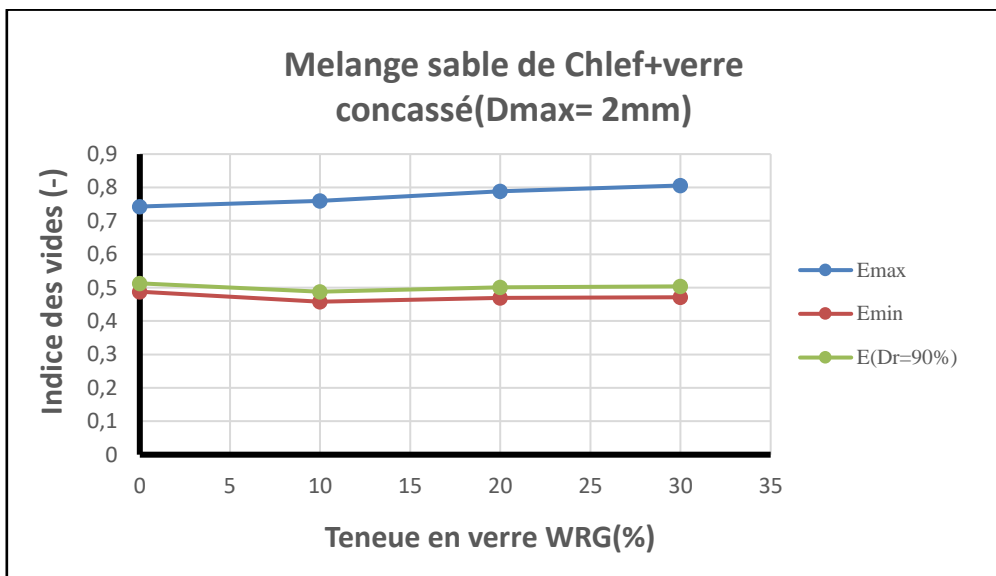
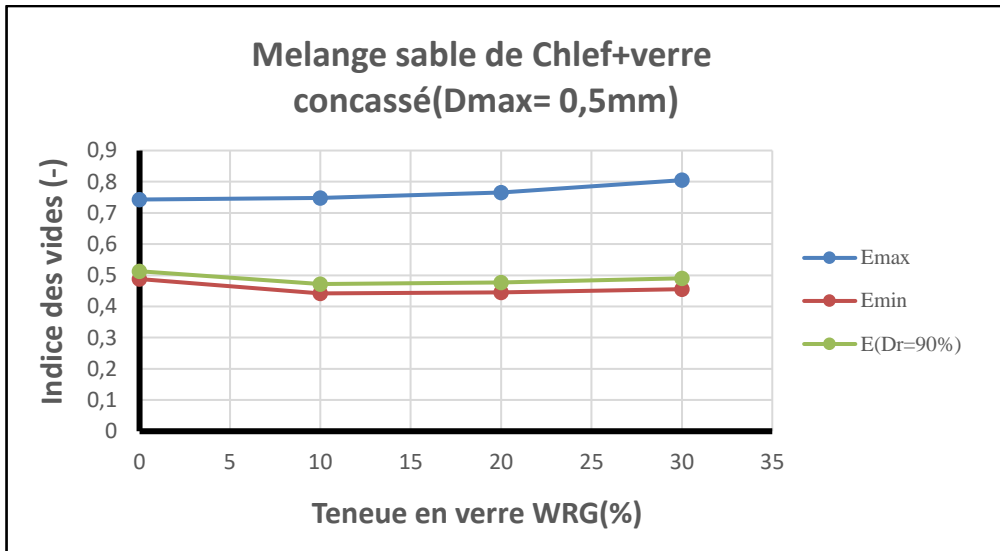


Figure 2.7 : Variation des indice des vides en fonction de la teneur en taille des particules de déchets de verre recyclé

Chapitre 02 : Dispositif expérimental et procédure de l'essai

Tableau 2.1 : Composition chimique de la taille des particules de verre concassé (Bayai et al 2020).

Constitution	Pourcentage (%)
Dioxyde de silicium (SiO ₂)	71.21 %
Oxyde de calcium (CaO)	13.3 %
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	10.1 %
Oxyde d'aluminium (Al ₂ O ₃)	1.91 %
Oxyde de magnésium (MgO)	2.4 %
Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	0.45 %
Autre composition	0.63 %

Tableau 2.2 : Propriétés physiques du mélange sable Chlef - déchets de verre recyclé.

	Sable Chlef	déchets de verre recyclé			Mélange Sable Chlef + déchets de verre recyclé								
		Classe 1 D _{max} = 0.5mm	Class2 D _{max} = 2mm	Classe3 D _{max} = 4mm	Sable de Chlef+ Classe 1			Sable de Chlef+ Classe 2			Sable de Chlef+ Classe 3		
WRG%	0	100	100	100	10	20	30	10	20	30	10	20	30
G _s	2.65	2.54	2.54	2.54	2.64	2.63	2.62	2.64	2.63	2.62	2.64	2.63	2.62
D ₁₀	0.13	0.093	0.244	0.463	0.205	0.17	0.131	0.238	0.230	0.174	0.253	0.207	0.209
D ₃₀	0.169	0.189	0.461	1.08	0.359	0.336	0.325	0.390	0.399	0.369	0.392	0.370	0.390
D ₅₀	0.208	0.313	0.950	1.88	0.503	0.479	0.466	0.538	0.558	0.542	0.531	0.520	0.552
D ₆₀	0.228	0.376	1.14	2.297	0.575	0.551	0.537	0.611	0.643	0.628	0.601	0.595	0.638
C _u	1.75	4.04	4.67	4.96	2.80	3.24	4.09	2.56	2.79	3.60	2.37	2.87	3.05
e _{max} (-)	0.743	-	-	-	0.748	0.765	0.806	0.760	0.789	0.806	0.760	0.753	0.746
e _{min} (-)	0.488	-	-	-	0.442	0.445	0.455	0.458	0.469	0.471	0.458	0.453	0.447
e(-)	0.513	-	-	-	0.472	0.477	0.490	0.488	0.501	0.504	0.488	0.483	0.476

2.4. Procédure de l'essai

2.4.1 Introduction

Pour effectuer les essais, suffisamment d'échantillons du mélange de sable- taille des particules de déchets de verre recyclé doivent être préparés pour effectuer au moins trois essais à différentes charges. Le choix du caisson de cisaillement « Casagrande » dépend de la nature du sol testé. Pour les sols pulvérulents, boîte carrée est préférable, pour les sols cohérents, les

caisses rondes sont recommandées. Il est important que la largeur ou le diamètre intérieur de la boîte soit supérieur à 5 cm mais pas inférieur à dix fois le diamètre équivalent de la plus grosse particule (pour le sable). Ces essais utilisent généralement une boîte de cisaillement carrée d'une longueur de côté de 6 cm.

2.4.2 Reconstruction de l'échantillon

Les mélanges ont été reconstitués en laboratoire en utilisant différentes proportions de taille des particules de déchets de verre recyclé (WRG=0%, 10%, 20% et 30%). De plus, la méthode de préparation utilisée est la « pluviation à sec », comme le montre la figure (2.6). La méthode consiste à préparer des échantillons en utilisant une seule densité relative ($D_r = 90\%$) et trois contraintes normales différentes ($\sigma_n = 100\text{ kPa}$, 200 kPa et 300 kPa).



Figure 2.8 : méthode de préparation des échantillons (Etat dense)

La détermination de la quantité de matériau correspondant aux différents états repose sur l'utilisation des paramètres suivants (D_r , e_{\min} et e_{\max}) comme suit :

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

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

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

Ou bien :

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

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

(V_t = volume du moule et 90 cm²).

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

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

Les masses des matériaux reconstruits par la méthode de la pluviation à sèche dans cette étude expérimentale est présentée dans le tableau (2.3) :

Tableau 2.3 : Les masses calculées pour les échantillons préparés par pluviation à sec

Matériaux	Classe de déchets de verre recyclé	Densité relative, D_r (%)	Masse de sol (gr)
Sable Chlef	Classe : 2mm → 0.08mm	90	157.58
		90	161.34
Mélange sable Chlef + déchets de verre recyclé	Classe : 0.5mm → 0.08mm	90	160.25
		90	157.64
		90	159.65
	Classe : 2mm → 0.08mm	90	157.69
		90	156.13
		90	159.65
	Classe : 4mm → 0.08mm	90	159.60
		90	158.92
		90	

2.4.3 Placer l'échantillon dans la boîte

Les deux demi-boîtes sont verrouillées et placées dans cet ordre :

- Fond de boîte ;
- pierre poreuse ;
- plaques cannelées (pierre poreuse et piston) avec rainures perpendiculaires à la direction du cisaillement (plaques perforées permettent des essais drainés, plaques pleines pour des essais non drainés) ;
- Échantillons de sol.

2.4.4 Installer le boîtier sur la machine

- Placer l'étrier de chargement sur le piston de la boîte ;
- Placer le comparateur verticalement et le mettre à zéro ;
- Installer l'anneau dynamométrique sur la machine, le fixer au boîtier et les jeux en mettant l'anneau légèrement en traction et en ramenant lentement le comparateur de l'anneau au zéro ;
- Appliquer la charge requise sur l'éprouvette, en principe :

❖ Pour sols pulvérulents : **100 - 200 – 300 kPa** ;

2.4.5 Lectures

Les déplacements horizontaux et verticaux et les contraintes tangentielles sont mesurés à l'aide de capteurs et de contrôleurs et enregistrés dans un système d'acquisition informatique. Arrêtez l'essai lorsque la contrainte de cisaillement devient constante ou lorsque la déformation horizontale atteint **7,5 mm**.

2.5. Conclusion

Ce chapitre présente les méthodes et outils utilisés pour étudier le comportement mécanique des mélanges de sable de Chlef contenant différentes proportions de taille des particules de verre concassé (déchets de déchets de verre recyclé) ($D_{\max}=4.00\text{mm}$, 2.00mm , 0.50mm) comprise dans la gamme $WRG=0\%$, 10% , 20% et 30%). Les échantillons ont été préparés en laboratoire à l'aide de techniques de préparation à la pluviation à sec et soumis à trois contraintes normales initiales ($\sigma = 100 \text{ kPa}$, 200 kPa et 300 kPa) et à une densité relatives constant ($D_r = 90 \%$). Les essais sont réalisés à l'aide d'un dispositif de cisaillement direct et la procédure d'essais est adaptée pour prendre en compte la structure du mélange étudié afin de produire des échantillons homogènes. La taille des particules et les propriétés granulométriques et physiques des mélanges de taille des particules de déchets de verre recyclé -sablé sont indiquées. Les sections suivantes se concentreront sur la réponse mécanique de ces mélanges, en se concentrant sur l'effet de la proportion de taille des particules de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique de leur sable de Chlef.

CHAPITRE III

IMPACT DE L'INCORPORATION DE DECHETS DE VERRE RECYCLE SUR LES PROPRIETES MECANIKUES DES SOLS GRANULAIRES

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

3.1 Introduction

Plusieurs chercheurs ont mené des études en laboratoire pour évaluer l'influence de la poudre de verre sur les caractéristiques mécaniques des sols sableux et argileux. Zaid et al. (2018) ont conduit une série d'essais pour évaluer les propriétés géotechniques des mélanges du sable avec la poudre de verre. Ils ont observé une augmentation de la résistance à la compression à mesure que la proportion de poudre de verre augmentait pour tous les échantillons. Javed et al. (2020) ont étudié l'impact de la poudre de verre sur l'amélioration des sols en réalisant des tests de compression non confinée. Ils ont constaté une augmentation de la résistance à la compression non confinée du sol jusqu'à 8% d'ajout de poudre de verre, suivie d'une diminution à 10%. Cette amélioration est attribuée à la présence de chaux dans la poudre de verre, agissant comme un liant avec les argiles, renforçant ainsi la liaison. Blayia et al. (2020) ont montré que l'addition de poudre de verre améliore la résistance des sols expansifs, avec une augmentation significative de l'angle de frottement interne. Mohammed Ali et al. (2022) ont étudié l'impact de différentes quantités de poudre de verre recyclé sur la résistance à la compression non confinée d'un sol stabilisé par géopolymère. Leur étude a révélé une augmentation linéaire de la résistance à la compression non confinée jusqu'à 15% de poudre de verre recyclé, au-delà de quoi la résistance a commencé à diminuer. Zitoufi et Louri (2023) ont observé une diminution notable de l'angle de frottement lors de l'augmentation de la proportion de poudre de verre dans les mélanges de sable et de poudre de verre reconstitués par la méthode de dépôt à sec. Leurs résultats mettent également en évidence des relations polynomiales claires entre la densité relative et l'angle de frottement interne pour tous les paramètres étudiés dans les mélanges sable-poudre de verre. Cependant, Cabalar et al. (2020) ont examiné les propriétés géotechniques de la bentonite traitée avec des granulats de verre recyclé, montrant que les échantillons avec des déchets de verre grossiers présentent une densité sèche maximale plus élevée et des valeurs d'humidité optimale plus basses que ceux avec des déchets de verre fins.

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

Après une analyse approfondie de ces études, il est notable que la recherche sur la réponse mécanique des sols granulaires renforcés par des particules de verre concassé, provenant de déchets de verre recyclé est très limitée par rapport à la poudre de verre. Afin d'explorer cet aspect, des essais de cisaillement direct ont été menés dans une boîte de Casagrande pour évaluer l'influence de l'ajout de ces déchets sur le comportement mécanique du sable de Chlef. Trois catégories de verre issues de déchets recyclés, avec des diamètres maximums de 0,5 mm, 2 mm et 4 mm, ont été considérées. Les échantillons des mélanges sable-déchets de verre ont été préparés en laboratoire par pluviation à sec, à une densité relative de 90%, et soumis à trois niveaux de contraintes normales initiales (100, 200 et 300 kPa). Les essais de cisaillement direct ont été réalisés sur le sable de Chlef reconstitué, contenant de 0 à 30% de déchets de verre recyclé par incréments de 10%, en prenant en compte tous les paramètres testés.

3.2. Résultats des essais réalisés

3.2.1. Diamètre maximal ; $D_{\max}=0.5$ mm

Afin d'étudier l'impact de la teneur en déchets de verre recyclé ($WRG = 0, 10, 20$ et 30%) sur la résistance au cisaillement des mélanges sable de Chlef-déchets de verre recyclé, les Figures 3.1, 3.2 et 3.3 présentent les résultats obtenus dans le cadre de cette étude. Les échantillons de sable ont été mélangés avec des déchets de verre recyclé ayant un diamètre maximal ($D_{\max}=0.5$ mm). Les différents mélanges sable de Chlef-déchets de verre recyclé ont été reconstitués par la technique de pluviation à sec à une densité relative initiale dense ($Dr= 90\%$ et soumis à trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa).

En général, les résultats des divers essais montrent clairement que l'incorporation de déchets de verre recyclé a un impact significatif sur le comportement mécanique des mélanges sable de Chlef-déchets de verre recyclé pour les trois différentes contraintes normales initiales étudiées. On observe une augmentation de la résistance au cisaillement avec l'augmentation de la teneur en déchets de verre recyclé jusqu'à un seuil de 20%, comme le montrent les Figures (3.1a, 3.2a et 3.3a). Les échantillons des mélanges sable de Chlef-déchets de verre recyclé avec une teneur de

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

20% conduisent à une augmentation de la résistance au cisaillement de 9%, 20% et 12% pour les trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa) respectivement, par rapport aux échantillons de sable pur non renforcé (WRG = 0%). Cette augmentation de la résistance au cisaillement est due à l'effet des déchets de verre recyclé (WRG \leq 20%) qui favorisent l'ovêtement des particules des mélanges, entraînant ainsi une amélioration notable de la résistance au cisaillement.

Au-delà de ce seuil de 20%, une tendance inverse a été observée, où les échantillons des mélanges sable-déchets de verre recyclé avec un WRG supérieur à 20% indiquent une réduction de la résistance au cisaillement de 4%, 10% et 23% pour les trois niveaux de contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa) respectivement, par rapport aux échantillons de sable de Chlef contenant 20% de déchets de verre recyclé. Cette diminution de la résistance au cisaillement s'explique par le fait que les échantillons mélangés avec une proportion élevée de déchets de verre recyclé (WRG = 30%) ayant un diamètre maximal de 0,5 mm entraînent des échantillons caractérisés par des particules plus fines, ce qui domine par rapport aux autres mélanges, en particulier, par rapport ceux avec un WRG de 20%, ce qui conduit à une diminution de la résistance au cisaillement.

Les résultats des essais dans le plan déplacement vertical-horizontal montre clairement le rôle de la fraction de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique du mélange sable de Chlef-déchets de verre recyclé, que la phase de dilatance augmente progressivement avec l'augmentation de la fraction de teneur en déchets de verre recyclé jusqu'à un seuil de 20%. Tandis que, la tendance inverse a été observée après de ce seuil de déchets de verre recyclé, ou les fractions de (WRG=30%) induit une diminution notable de la phase de dilatance comme illustré dans les Figures (3.1b, 3.2b et 3.3b).

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

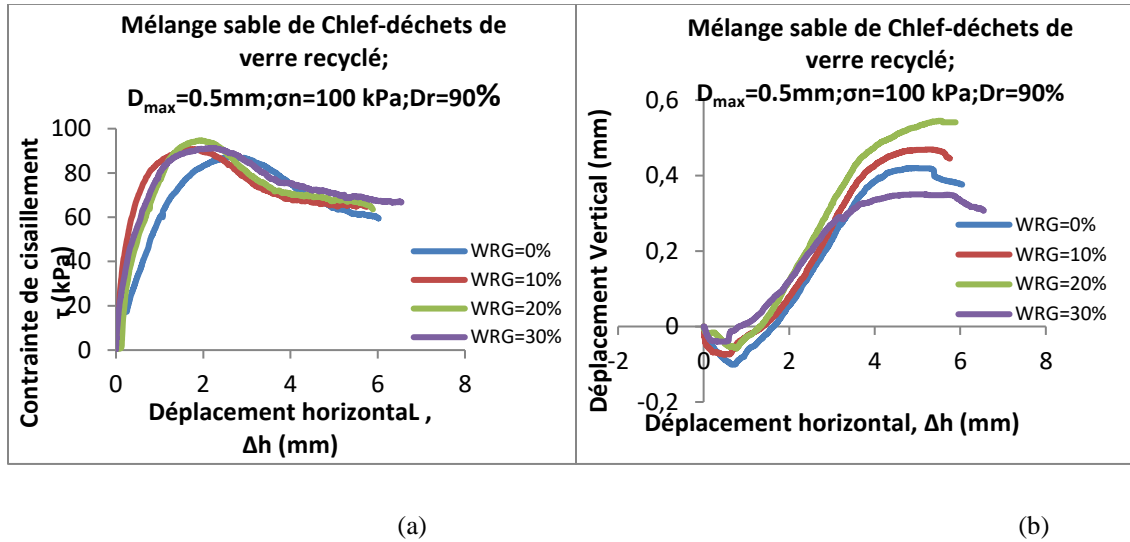


Figure 3.1 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max} = 0.5\text{ mm}$; $\sigma_n=100\text{ kPa}$)

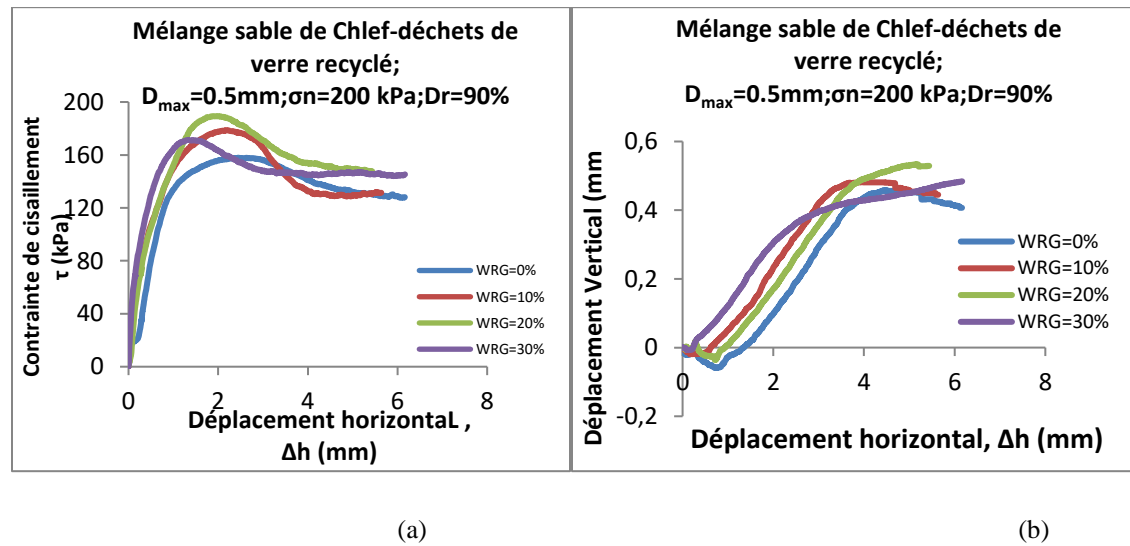


Figure 3.2 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max} = 0.5\text{ mm}$; $\sigma_n=200\text{ kPa}$)

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

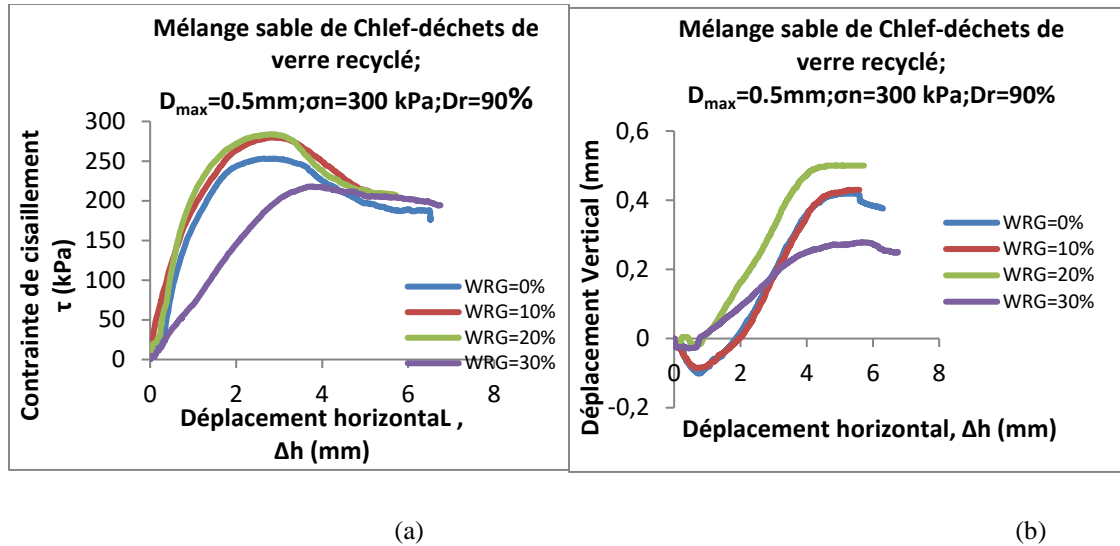


Figure 3.3 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max} = 0.5 \text{ mm}$; $\sigma_n = 300 \text{ kPa}$)

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

3.2.2. Diamètre maximal ; $D_{max} = 2 \text{ mm}$

Une série d'essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande a été réalisée afin d'étudier l'impact de la teneur en déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique du sable de Chlef. Les Figures 3.4, 3.5 et 3.6 sont établies pour cette raison. Les échantillons des mélanges sable de Chlef-déchets de verre recyclé ont été reconstitués en laboratoire par la technique de pluviation à sec, avec des teneurs en déchets de verre recyclé variant de 0% à 30% par intervalles de 10%, à une densité relative de 90% (état dense), et soumis à trois contraintes normales initiales de 100, 200 et 300 kPa. Les différents mélanges ont été renforcés avec des déchets de verre recyclé caractérisés par un diamètre maximal (D_{max}) de 4 mm.

Les résultats des différents essais indiquent que l'augmentation du pourcentage de déchets de verre recyclé a un impact remarquable sur la résistance au cisaillement des échantillons de mélanges pour les trois contraintes normales initiales considérées. D'après les Figures (3.4a, 3.5a et 3.6a), l'augmentation de la teneur en déchets de verre recyclé induit généralement une

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

augmentation de la résistance au cisaillement jusqu'à une teneur de 30% ($\tau_{pic} = 87,27, 157,88$ et $253,19$ kPa pour $WRG = 0\%$; $\tau_{pic} = 98,19, 183,86$ et $283,61$ kPa pour $WRG = 10\%$; $\tau_{pic} = 102,33, 193,38$ et $284,55$ kPa pour $WRG = 20\%$; et $\tau_{pic} = 107,91, 217,91$ et $285,52$ kPa pour $WRG = 30\%$, pour les trois contraintes normales initiales sélectionnées ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa), respectivement). Cette tendance d'augmentation de la résistance au cisaillement est attribuée au rôle des déchets de verre recyclé qui favorisent l'enchevêtrement des particules des mélanges, conduisant à une amélioration remarquable de la résistance au cisaillement et, par conséquent, à des échantillons plus stables. Ces résultats sont en bon accord avec les travaux expérimentaux d'essais triaxiaux non drainés rapportés par Disfani et al. 2011 et 2012.

Les Figures (3.4b, 3.5b et 3.6b) illustrent la variation du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal en tenant compte de l'impact de la fraction de déchets de verre recyclé. Les résultats obtenus confirment le rôle de ce paramètre, car la phase de dilatance augmente progressivement avec l'augmentation de la proportion de déchets de verre recyclé ajoutée, ce qui entraîne un comportement plus résistant ou des échantillons plus stables.

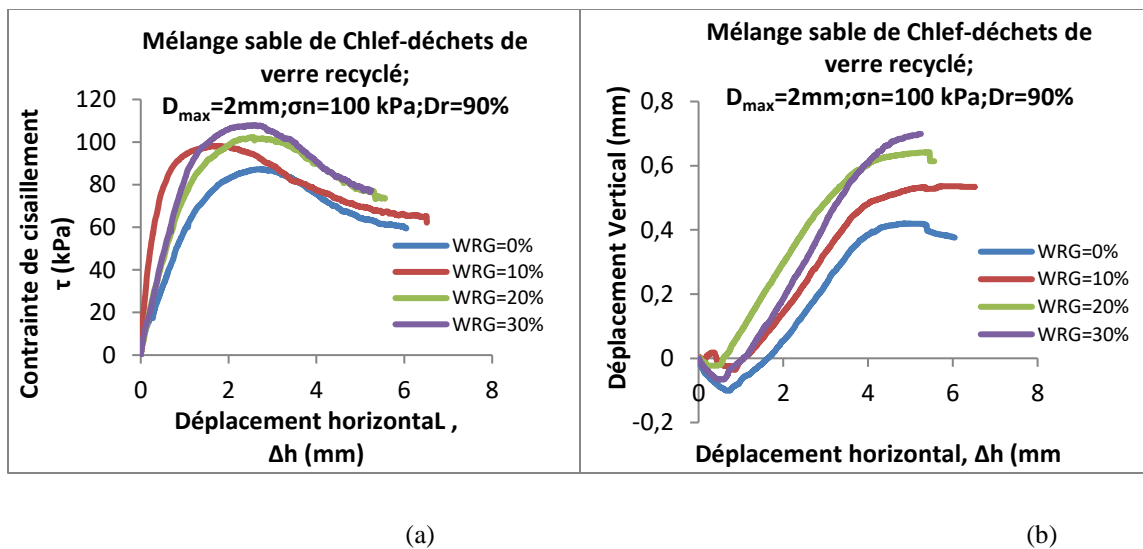


Figure 3.4 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max} = 2 \text{ mm}$; $\sigma_n = 100 \text{ kPa}$)

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

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

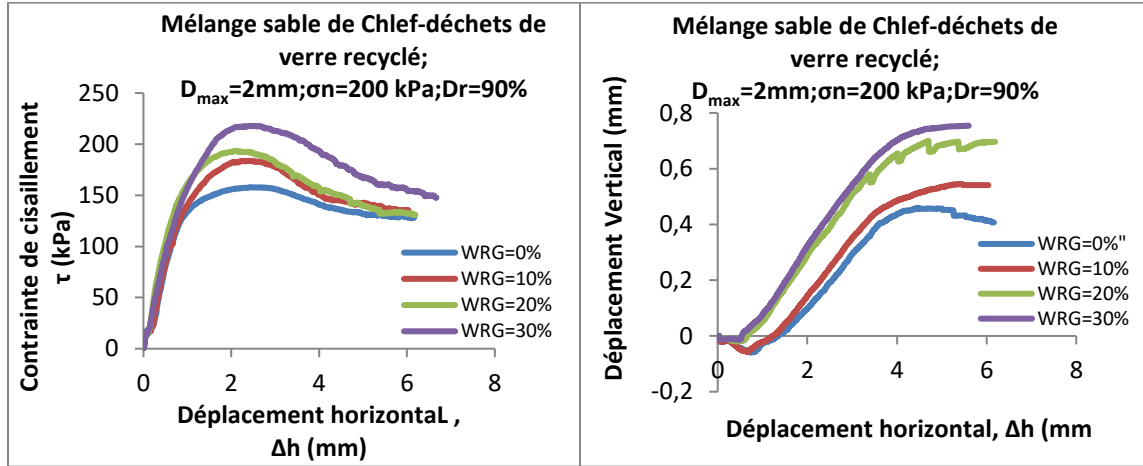


Figure 3.5 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=2\text{ mm}$; $\sigma_n=200\text{ kPa}$)

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

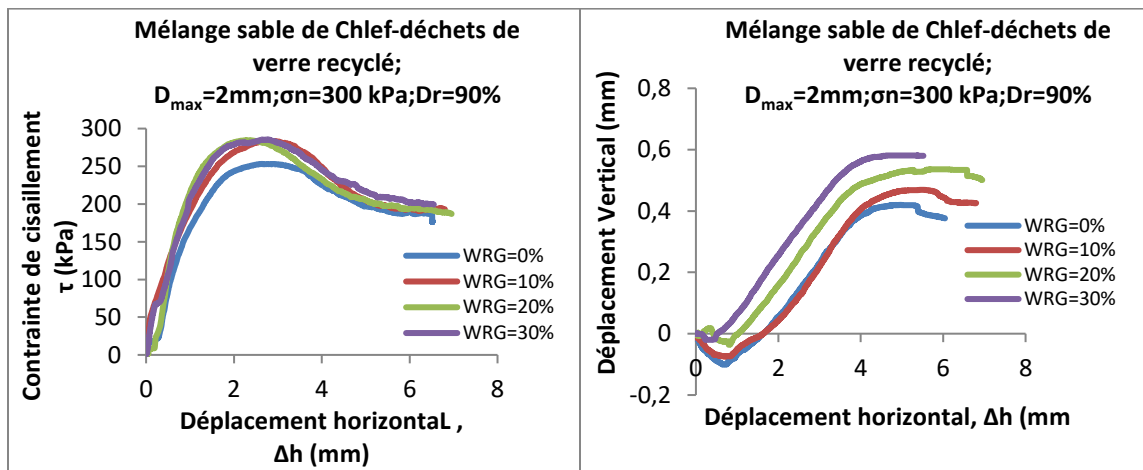


Figure 3.6 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=2\text{ mm}$; $\sigma_n=300\text{ kPa}$)

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

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

3.2.3. Diamètre maximal ; $D_{\max}=4$ mm

Les Figures 3.7-3.9 présentent les résultats des essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande visant à analyser l'effet de la teneur en déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique des échantillons de mélanges sable de Chlef-déchets de verre recyclé. Les échantillons de sable ont été renforcés avec des déchets de verre recyclé ayant un diamètre maximal ($D_{\max}=4$ mm), avec des teneurs en déchets allant de 0% à 30% par pas de 10%. Les différents mélanges ont été préparés en laboratoire par la méthode de pluviation à sec à état de densité dense ; ($D_r = 90\%$), sous trois contraintes normales initiales de 100, 200 et 300 kPa.

À partir de ces figures, on remarque que la résistance au cisaillement augmente progressivement avec l'augmentation de la teneur en déchets de verre recyclé pour les trois contraintes normales initiales sélectionnées. Les échantillons du mélange sable de Chlef-déchets de verre recyclé avec une teneur de 30% ($WRG = 30\%$) indiquent une augmentation de la résistance au cisaillement de 33%, 41% et 23% pour les trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa), respectivement, par rapport aux échantillons de sable de Chlef non renforcé ($WRG = 0\%$), comme illustré dans les Figures 3.7a, 3.8a et 3.9a. De plus, en comparant les résultats obtenus dans les Figures (3.1-3.9), on constate que l'impact de la teneur en déchets de verre recyclé est très remarquable sur la résistance au cisaillement pour la contrainte initiale moyenne ($\sigma_n = 200$ kPa), par rapport aux échantillons soumis aux deux autres contraintes initiales (faible : $\sigma_n = 100$ kPa et élevée : $\sigma_n = 300$ kPa), et ce, pour les trois catégories de déchets de verre recyclé ($D_{\max} = 0,5, 2$ et 4 mm).

Les Figures (3.6b et 3.9b) montrent l'évolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal en tenant compte de l'influence de la teneur en déchets de verre recyclé. Les résultats du déplacement vertical confirment les observations de la résistance au cisaillement, montrant que l'incorporation de la fraction de déchets de verre recyclé favorise l'amélioration de la phase de dilatance, conduisant ainsi à des échantillons plus stables.

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

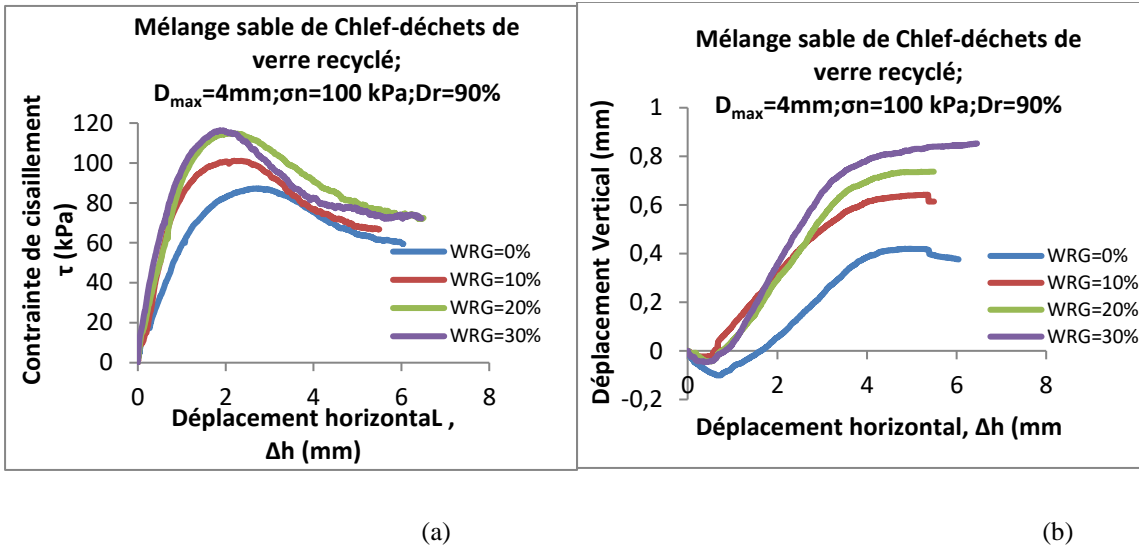


Figure 3.7 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=4\text{ mm}$; $\sigma_n=100\text{ kPa}$)

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

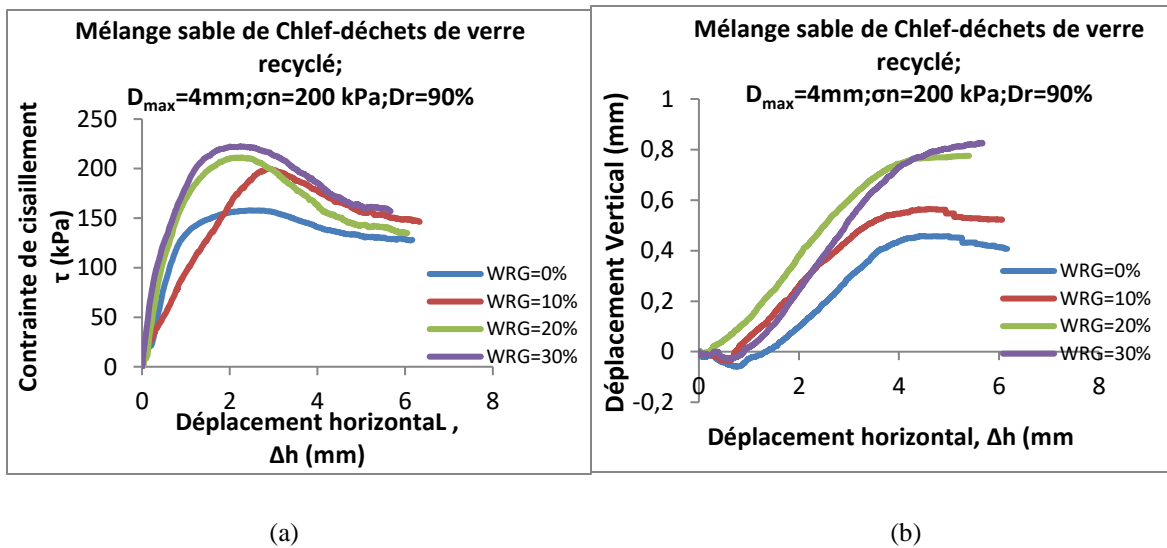


Figure 3.8 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=4\text{ mm}$; $\sigma_n=200\text{ kPa}$)

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

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

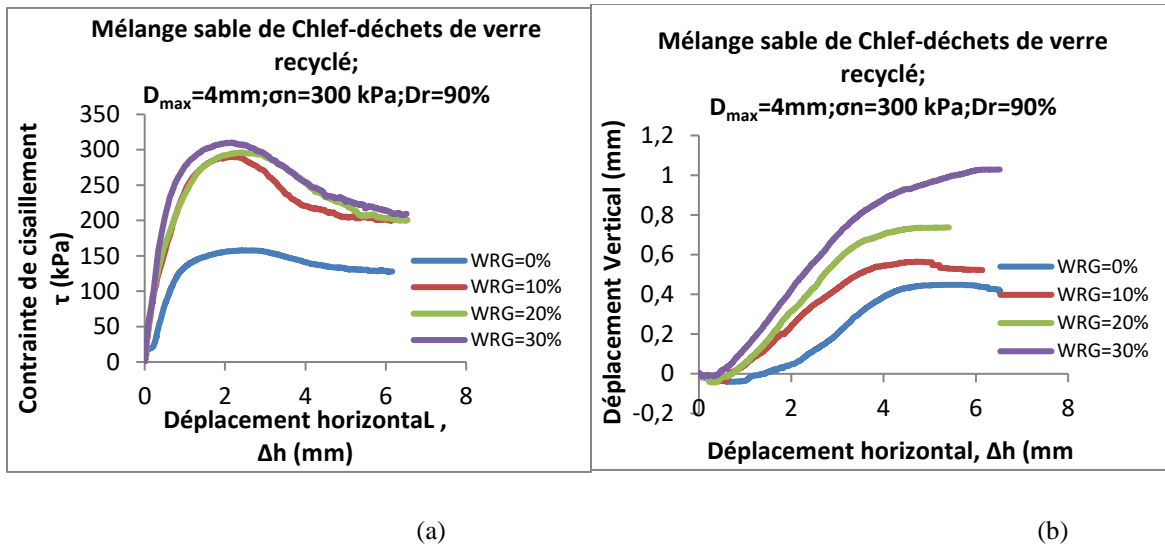


Figure 3.9 : Effet de la teneur en déchets de verre sur le comportement mécanique ($D_{max}=4\text{ mm}$; $\sigma_n=300\text{ kPa}$)

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

3.3. Effet de la teneur en déchets de verre recyclé sur la résistance au cisaillement maximale

Les résultats de cette étude (Figures 3.1-3.9) sont résumés dans les Figures 3.10 afin d'évaluer l'impact de la teneur en déchets de verre recyclé sur la résistance au cisaillement maximale des mélanges sable de Chlef-déchets de verre recyclé, en considérant une gamme de déchets allant de WRG=0% à WRG=30% et les trois catégories de déchets de verre recyclé ($D_{max}=0.5, 2$ et 4 mm). Les échantillons ont été préparés à une densité relative initiale dense ($Dr=90\%$) sous trois contraintes normales initiales ($\sigma_n=100, 200$ et 300 kPa). En général, on remarque que la teneur en déchets de verre recyclé est un paramètre pertinent dans le but d'améliorer la résistance au cisaillement des sols sableux. A partir de l'histogramme illustré sur la Figure 10.a, les échantillons de sable renforcés par les déchets de verre recyclé ayant $D_{max}=0.5\text{mm}$, indiquent une

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

augmentation de la résistance au cisaillement maximale avec l'augmentation de la teneur en déchets de verre recyclé jusqu'à 20%. Au-delà de ce seuil, une diminution de la résistance au cisaillement est observée pour les mélanges avec un WRG supérieur à 20%. En revanche, les deux autres catégories de déchets de verre recyclé ($D_{max}=2$ et 4 mm) montrent une augmentation continue de la résistance au cisaillement maximale avec l'augmentation de la teneur en déchets de verre recyclé (de WRG=0 à 30%) pour les trois contraintes normales initiales considérées ($\sigma_n=100, 200$ et 300 kPa), comme illustré dans les Figures 3.10b et 3.10c. De plus, pour une teneur donnée en déchets de verre recyclé, une augmentation de la contrainte normale initiale entraîne une amélioration plus importante de la résistance au cisaillement pour tous les paramètres étudiés. Enfin, la Figure 11 suggère une relation polynomiale pour exprimer la résistance au cisaillement maximale en fonction de l'évolution de la teneur en déchets de verre recyclé, en tenant compte des trois diamètres maximaux de WRG ($D_{max}=0.5, 2$ et 4 mm) et de la gamme de contraintes normales initiales étudiée ($\sigma_n=100, 200$ et 300 kPa).

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

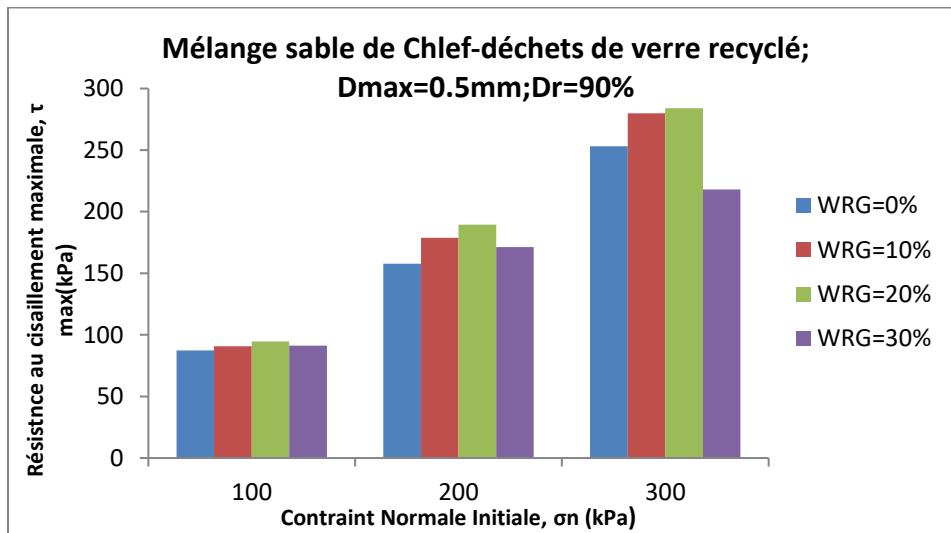
Le Tableau 3.1 illustre les coefficients A, B, C et le coefficient de corrélation correspondant (R^2) pour les matériaux sélectionnés à l'étude

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

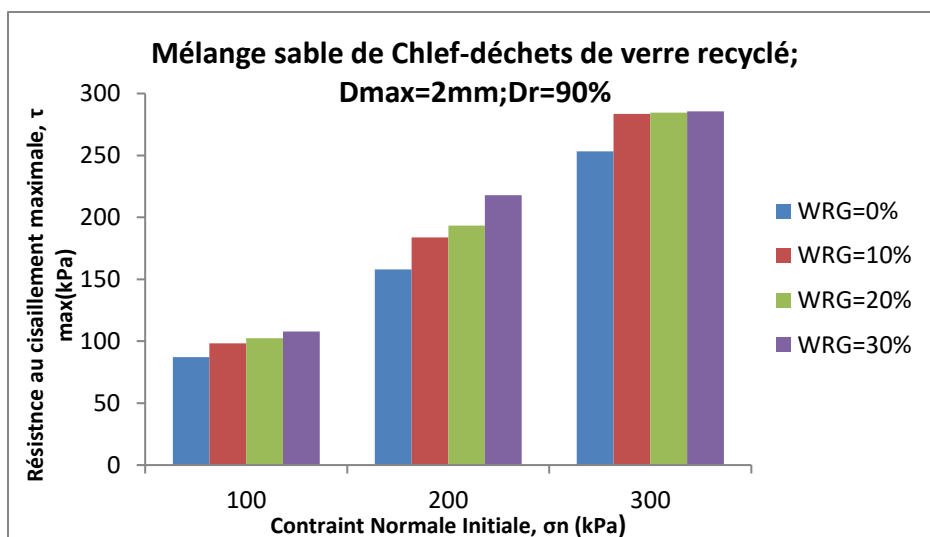
$D_{max}(mm)$	σ_n (kPa)	A	B	C	R^2
0.5	100	-0,0133	1,0606	87,689	0,9852
	200	-0,0036	2,0044	159,46	0,9732
	300	-0,0736	3,1878	254,67	0,9412
2	100	-0,0133	1,0606	87,689	0,9852
	200	0,0036	2,0044	159,46	0,9732
	300	-0,0736	3,1878	254,67	0,9412
	100	-0,0172	0,6772	86,883	0,8883

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

4	200	-0,0773	4,3685	159,39	0,981
	300	-0,0572	3,4883	255,13	0,9577

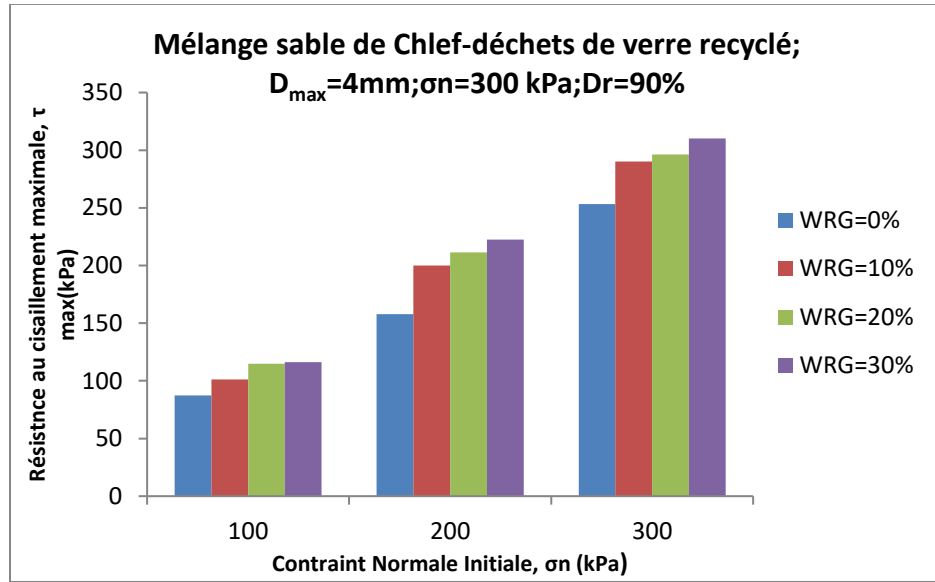


(a)



(b)

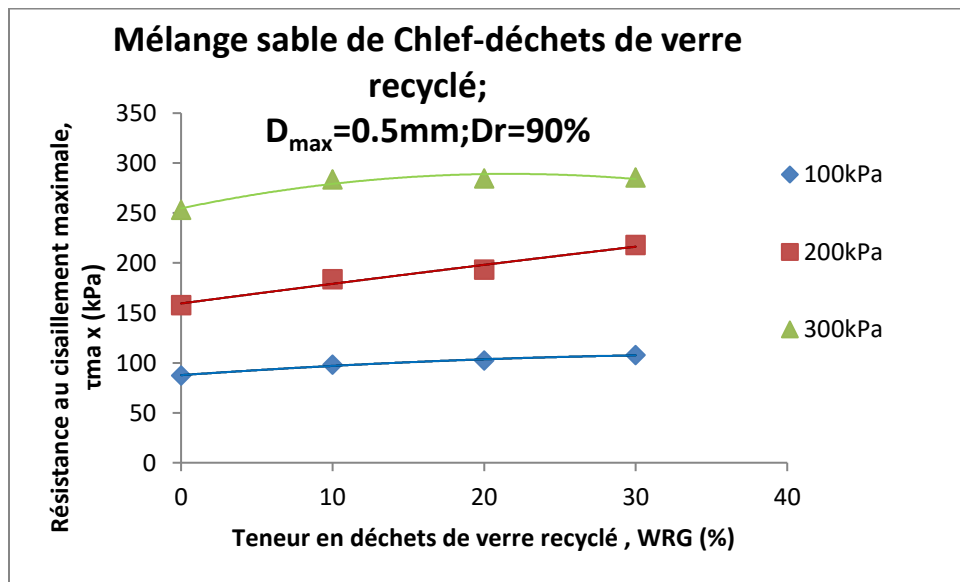
Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires



(c)

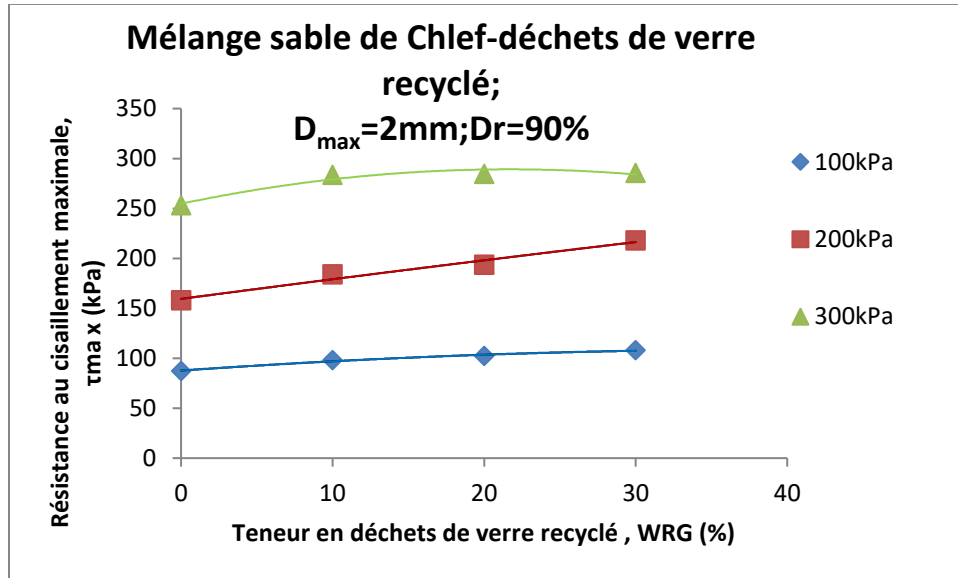
Figure 3.10: Résistance au cisaillement maximal en fonction de la contrainte initial

(a)- $D_{max}=0.5mm$, (b)- $D_{max}=2mm$,(c)- $D_{max}=4 \text{ mm}$

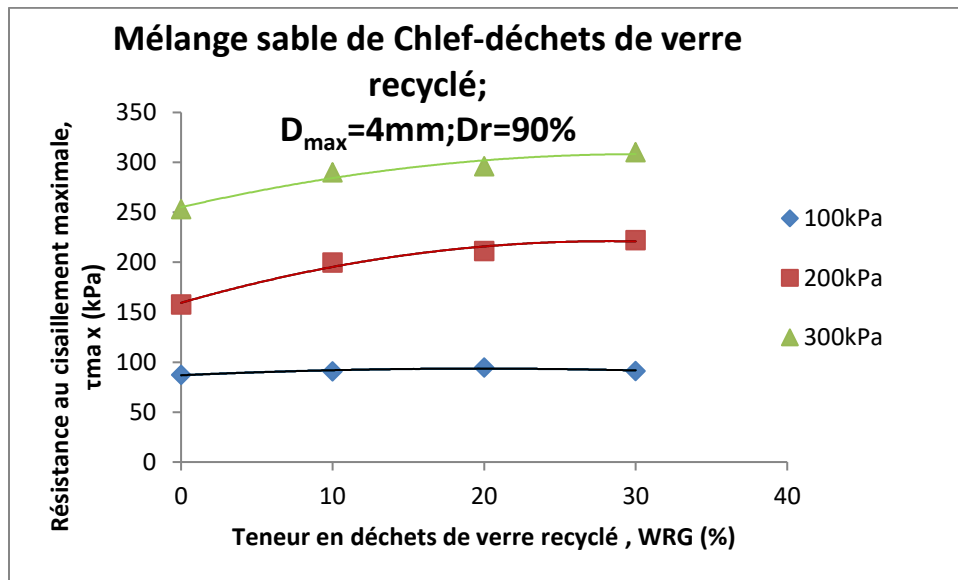


(a)

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires



(b)



(c)

Figure 3.11: Effet de la teneur en déchets de verre recyclé et la contrainte normale initiale sur la résistance au cisaillement maximale (a)- $D_{max}=0.5$, (b)- $D_{max}=2$, (c)- $D_{max}=4$

3.4. Influence de la teneur en déchets de verre recyclé sur la résistance au cisaillement normalisée

La Figure 3.12 présente l'impact de la teneur en déchets de verre recyclé sur la variation de la résistance au cisaillement maximale normalisée (τ_{\max}/σ_n) des mélanges sable de Chlef-déchets de verre recyclé, avec des teneurs allant de WRG=0% à 30% par incréments de 10%. Les différents mélanges ont été préparés à une densité relative de 90%. A partir de cette figure, en se concentrant sur la première catégorie de WRG ($D_{\max}=0.5$ mm), on constate que la résistance au cisaillement maximale normalisée augmente avec l'augmentation de la teneur en déchets de verre recyclé jusqu'à 20% pour les trois classes de déchets de verre recyclé et par contre la tendance inverse a été observée lorsque la teneur en déchets de verre recyclé devenait supérieure à ce seuil pour tous les paramètres sélectionnés. De plus, il est clairement observé que la résistance au cisaillement normalisée des échantillons préparés avec les deux autres catégories ($D_{\max}=2$ et 4 mm) montre une augmentation continue de la résistance maximale normalisée. En outre, une relation polynomiale peut être établie pour exprimer la corrélation entre la résistance au cisaillement maximale normalisée et la teneur en déchets de verre recyclé pour les matériaux testés.

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

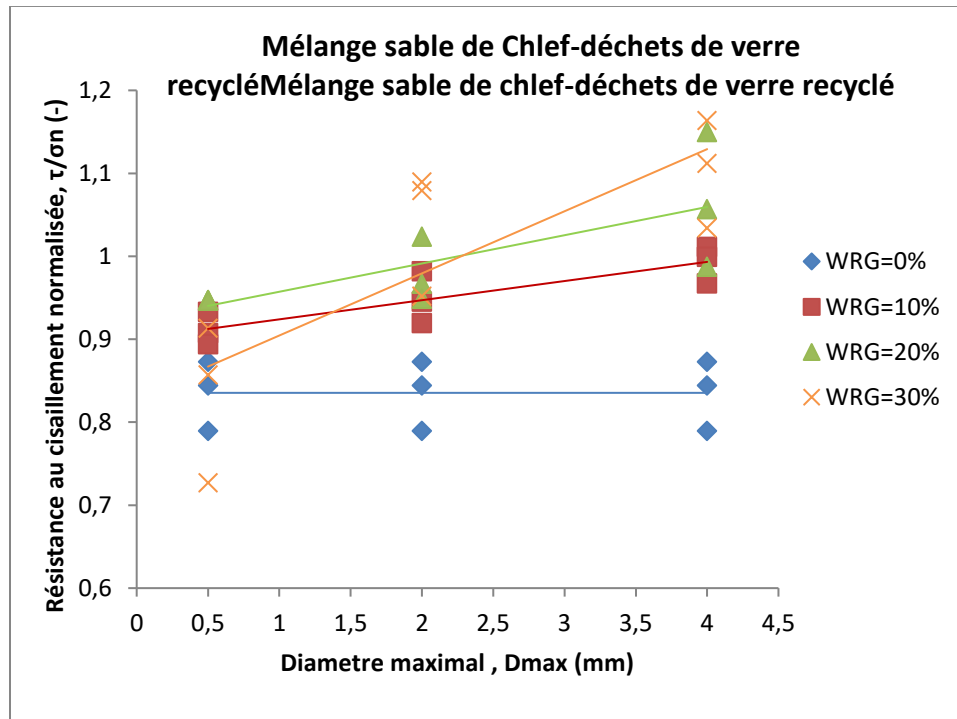


Figure 3.12 : Impact de la teneur en déchets de verre recyclé sur résistance au cisaillement normalisée (τ/σ_n)

3.5. Influence de la teneur en déchets de verre recyclé sur l'angle de frottement

Afin d'évaluer l'influence de la proportion de déchets de verre recyclé (en tenant compte des trois classes de WRG) sur l'angle de frottement interne du sable de Chlef, les résultats de cette étude (présentés dans les Figures 3.1 à 3.9) sont repris dans la figure 3.13. Les échantillons de sable de Chlef ont été mélangés avec des déchets de verre recyclé allant de 0% à 30% pour les trois contraintes normales ($\sigma_n=100, 200$ et 300 kPa), avec des incréments de 10%. Les résultats mettent en évidence l'importance de l'ajout de déchets de verre recyclé sur l'angle de frottement du sable de Chlef pour toutes les classes considérées, confirmant ainsi les observations précédentes sur la résistance au cisaillement. On constate que l'augmentation de la proportion de déchets de verre recyclé entraîne une augmentation de l'angle de frottement jusqu'à un seuil de 20% de déchets de verre recyclé pour la première catégorie de WRG ($D_{max}=0.5$ mm). Cependant,

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

au-delà de ce seuil, une tendance inverse est observée pour tous les paramètres testés. Par exemple, une proportion de 30% de déchets de verre recyclé a conduit à une diminution de 11% de l'angle de frottement par rapport à un échantillon contenant 20% de déchets de verre recyclé. Tandis que, l'augmentation de la proportion de déchets de verre recyclé améliore notablement l'angle de frottement sans seuil spécifique considérant les deux autres classes de WRG ($D_{max}=2$ et 4 mm). De plus, il existe une forte corrélation entre l'angle de frottement et la proportion de déchets de verre recyclé, avec des coefficients de détermination (R^2) de 0,87, 0,96 et 0,98 pour les trois catégories de déchets de verre recyclé ($D_{max}=0.5, 2$ et 4 mm) respectivement. En prenant en compte tous les paramètres étudiés, l'équation suivante est proposée pour exprimer l'évolution de l'angle de frottement (φ) en fonction de la teneur en déchets de verre recyclé (WRG).

$$(\varphi) = A \times (D_{max})^2 + B \times (D_{max}) + C \quad (3.2)$$

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)

Matériaux testés	WRG (%)	A	b	c	R^2
Classes granulaires ($0.5 \text{ mm} \leq D_{max} \leq 4.00 \text{ mm}$)	10	-0,3606	2,4369	39,402	1
	20	-0,2575	1,9697	40,427	1
	30	-1,1837	7,452	33,941	1

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

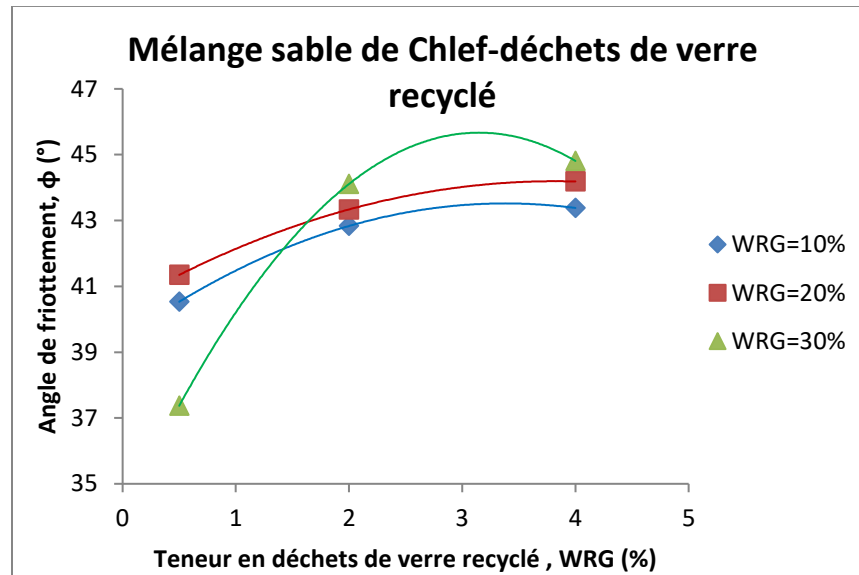


Figure 3.13 : Angle de frottement en fonction de déchets de verre recyclé pour les matériaux

3.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'explorer l'impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique des échantillons de sable de Chlef reconstitués par la méthode de pluviation à sec. Trois catégories de déchets de verre recyclé, caractérisées par leur diamètre maximal ($D_{max}=0.5, 2$ et 4 mm), ont été utilisées. Des proportions de déchets de verre recyclé allant de 0% à 30% ont été ajoutées aux échantillons de sable, avec un intervalle de 10%. Les échantillons ont été soumis à trois niveaux de contraintes normales initiales ($\sigma_n=100, 200$ et 300 kPa) avec une densité initiale dense ($D_r=90\%$). Les conclusions tirées dans ce chapitre sont discutées ci-dessous.

Les essais réalisés sur divers mélanges à la boîte ont démontré que l'incorporation de déchets de verre recyclé a un effet notable sur l'amélioration des caractéristiques du sable de Chlef, notamment en termes de résistance maximale au cisaillement, de résistance maximale au cisaillement normalisée et d'angle de frottement.

Chapitre 03: Impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur les propriétés mécaniques des sols granulaires

D'après ces résultats, on peut en conclure que la teneur en déchets de verre recyclé est un paramètre pertinent dans le but d'améliorer la résistance au cisaillement des sols sableux, où, l'augmentation de la proportion de déchets de verre recyclé entraîne une amélioration du comportement mécanique (en termes de la résistance au cisaillement et de l'angle de frottement). Les échantillons de sable renforcés par des déchets de verre recyclé de taille $D_{\max}=0,5$ mm montrent une augmentation de la résistance au cisaillement et de l'angle de frottement avec l'augmentation de la quantité de déchets de verre recyclé jusqu'à 20%. Après ce seuil, une diminution de ces paramètres a été observée pour les mélanges contenant plus de 20% de déchets de verre recyclé. Alors que, les deux autres catégories de déchets de verre recyclé ($D_{\max}=2$ et 4 mm) présentent une amélioration continue des propriétés mécaniques avec l'augmentation de la quantité de déchets de verre recyclé (de 0 à 30% de WRG) pour les trois contraintes normales initiales considérées ($\sigma_n=100$, 200 et 300 kPa).

Les résultats obtenus montrent que l'impact de la teneur en déchets de verre recyclé est très remarquable sur la résistance au cisaillement pour la contrainte initiale moyenne ($\sigma_n = 200$ kPa), par rapport aux échantillons soumis aux deux autres contraintes initiales (faible : $\sigma_n = 100$ kPa et élevée : $\sigma_n = 300$ kPa).

CHAPITRE 4

EFFET DE LA TAILLE DES PARTICULES DE VERRE CONCASSE SUR LA REPOSE MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

4.1 Introduction

La taille des grains est l'un des facteurs les plus importants contrôlant le comportement mécanique des sols granulaires. Plusieurs recherches ont été menées sur ce sujet; Islam et al. (2011) ont prouvé que l'augmentation de la taille des grains conduit à une augmentation significative de la résistance au cisaillement maximale les propriétés mécaniques comme l'angle de frottement interne. Belkhatir et al. (2011) ont analysé l'influence de la taille des grains en termes de diamètre efficace et diamètre moyen (D_{10} et D_{50}) sur la réponse cyclique d'un sable limoneux. Ils ont clairement montré que les diamètres (D_{10} et D_{50}) ont un effet notable sur le comportement mécanique cyclique des mélanges sable-limon. Wang et al. (2013) ont conclu que la taille des grains a un impact primordial sur l'angle de frottement des sols sableux suite des essais triaxiaux et de cisaillement direct à la boîte. De plus, Ils ont remarqué que l'angle de frottement interne augmente avec l'augmentation de la taille des grains. L'étude menée par Liu et al. (2014) a examiné l'influence de la taille des particules sur le comportement mécanique des matériaux granulaires. Ils ont observé une diminution de la résistance au cisaillement non drainé avec l'augmentation du coefficient d'uniformité du mélange, avec le coefficient "Cu" variant de 1,1 à 20, suivant une corrélation polynomiale. Prashanth et al. (2015) ont trouvé que la résistance au cisaillement au pic des sables ayant des caractéristiques morphologiques similaires et un indice des vides constant est affectée par la taille des grains. Cherif Taiba (2017) a étudié l'effet de la taille des particules sur la résistance au cisaillement non drainée à travers une série des essais triaxiaux sur trois sables ayant différents diamètres maximaux. Il a montré que le diamètre maximale ($D_{max} = 2.00$ mm, 0.63 mm et 0.25 mm) a un effet très pertinent sur la résistance au cisaillement non drainée.

En analysant ce qui précède, les recherches mentionnées se sont concentrées sur l'impact de la taille des particules du sol sur leurs propriétés mécaniques. Cependant, l'étude de la taille des matériaux de renforcement, tels que les déchets de verre recyclé dans notre cas, est encore peu explorée. Ainsi, ce chapitre vise principalement à analyser comment le diamètre maximal (D_{max}) des particules de verre concassé (déchets de verre recyclé) influence le comportement mécanique

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

du sable de Chlef en utilisant la boîte de cisaillement direct. Pour ce faire, des échantillons de sable (reconstitués en laboratoire avec des diamètres extrêmes constants, $D_{\max}=2\text{mm}$ et $D_{\min}=0.08\text{mm}$) ont été mélangés avec des déchets de verre recyclé ayant divers diamètres maximaux ($D_{\max}=0.5, 2$ et 4 mm) avec même diamètre minimal ($D_{\min} = 0.08\text{ mm}$). Les différents échantillons de mélanges sable-déchets de verre recyclé ont été reconstitués au laboratoire avec la méthode pluviation à sec à une densité relative dense (90 %) et avec les fractions déchets de verre recyclé considérés (WRG=10 %, 20 % et 30 %) et soumis à trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100\text{ kPa}, 200\text{ kPa}$ et 300 kPa).

4.2. Résultats des essais réalisés

4.2.1. Sable de Chlef renforcé par 10% de déchets de verre recyclé ; WRG=10%

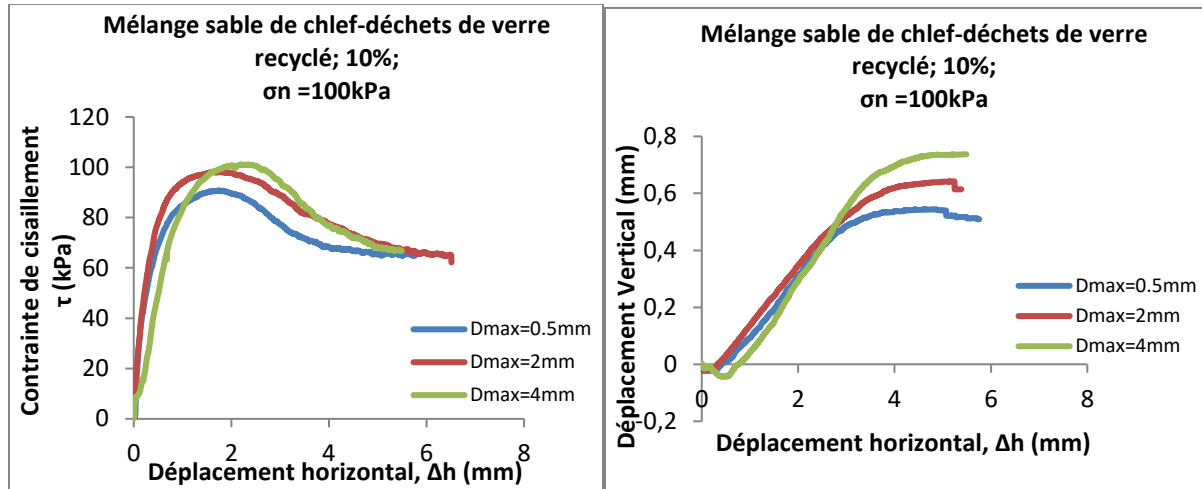
Les figures 4.1, 4.2 et 4.3 illustrent les résultats des essais de cisaillement direct réalisés sur le sable de Chlef renforcé par une proportion de 10% de déchets de verre recyclé (WRG=10%), pour le but d'analyser l'effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé ($D_{\max}=0.5, 2$ et 4 mm) sur le comportement de ce mélange. Les échantillons, composés de différents mélanges, ont été préparés en laboratoire par la méthode de pluviation à sec et soumis à trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa) avec une densité relative initiale de 90% (Etat dense). Les résultats obtenus, montrent clairement que le diamètre maximal des particules de verre concassé (D_{\max}) a un effet insignifiant sur la résistance au cisaillement des échantillons du sable de Chlef mélangé avec 10% de déchets de verre recyclé, ou la résistance au cisaillement augmente progressivement avec l'augmentation de diamètre maximal de WRG ($D_{\max}=0.5\text{ mm}, 2.0\text{ mm}, 4.0\text{ mm}$) pour les trois contraintes normales initiales considérées ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa). Cependant, pour les trois diamètres maximaux ($D_{\max}=0.5\text{mm}, 2\text{mm}$ et 4mm), cette augmentation de résistance au cisaillement reste modérée pour la contrainte normale élevée ($\sigma_n = 300\text{ kPa}$), ($\tau_{\max} = 290.11\text{ kPa}$ pour $D_{\max}=4\text{ mm}$, 283.61 kPa pour $D_{\max}=2\text{ mm}$ et 279.86 kPa pour $D_{\max}=0.5\text{ mm}$, ou en d'autres sens, les échantillons des mélanges sable de Chlef-déchets de verre recyclé avec la teneur de 10% ayant un diamètre maximal ($D_{\max}=4\text{mm}$) conduisent à une augmentation de la

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

résistance au cisaillement de 3.5% pour considérant cette contrainte normale initiale ($\sigma_n = 300$ kPa) respectivement, par rapport aux mêmes échantillons ayant ($D_{max} = 0.5$ mm). De plus, cette augmentation devient prononcée pour les deux autres contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100$ et 200 kPa) : ($\tau_{max} = 101.11$ kPa, 98.19 kPa, 90.5 kPa pour $\sigma_n = 100$ kPa et $\tau_{max} = 199.86$ kPa, 183.86 kPa, 178.78 kPa pour $\sigma_n = 200$ kPa) pour les trois diamètres maximaux ($D_{max} = 4$ mm, 2 mm et 0.5 mm) respectivement, ce qui a permis au taux d'amélioration d'atteindre 10% pour $\sigma_n = 100$ kPa et 11% pour $\sigma_n = 200$ kPa. L'augmentation de la résistance maximale au cisaillement est attribuée à l'augmentation du diamètre maximal des particules, ce qui entraîne un élargissement significatif de la taille des particules des mélanges. Par exemple, pour un D_{max} de 4 mm de déchets de verre recyclé, la présence de la fraction des grains entre $D = 2$ mm et $D = 4$ mm joue un rôle important pour augmenter la résistance au cisaillement de ces échantillons en comparaison avec les échantillons préparés avec D_{max} de 0,5 mm et 2 mm qui ne contiennent pas cette fraction de grains.

Les figures 4.1b, 4.2b et 4.3b montrent l'influence du diamètre maximal des déchets de verre recyclé sur la variation du déplacement vertical du sable de Chlef renforcé par 10% de ces déchets. Il est observé que l'augmentation du diamètre maximal des particules de verre a un effet remarquable sur le comportement mécanique en termes de la réponse contractance-dilatance. Lorsque le diamètre maximal augmente, la phase de dilatance des échantillons augmente, ce qui entraîne une augmentation de la résistance au cisaillement, considérant tous les paramètres testés.

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

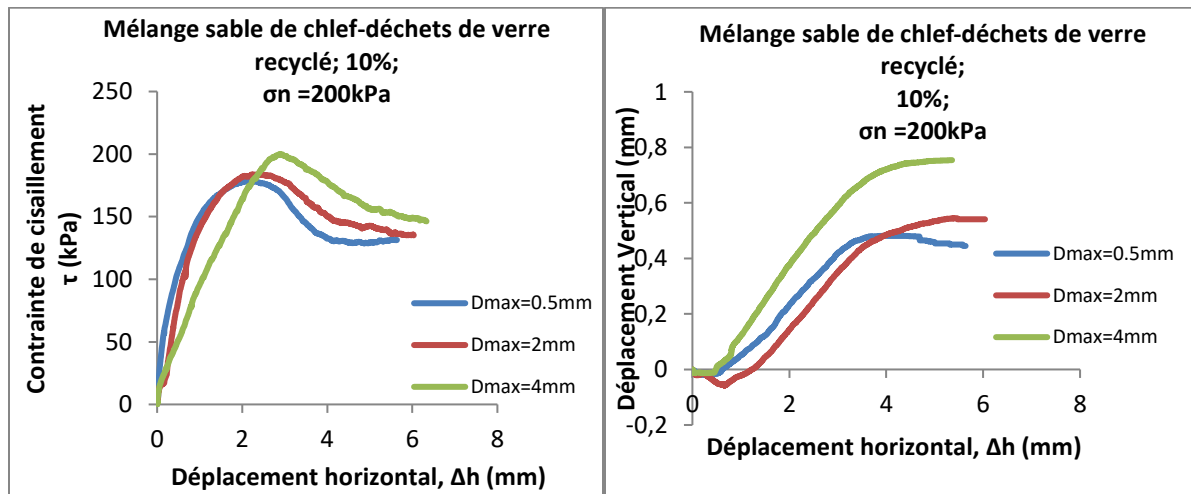


(a)

(b)

Figure 4.1 : Effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique (WRG=10% ; $\sigma_n=100$ kPa)

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



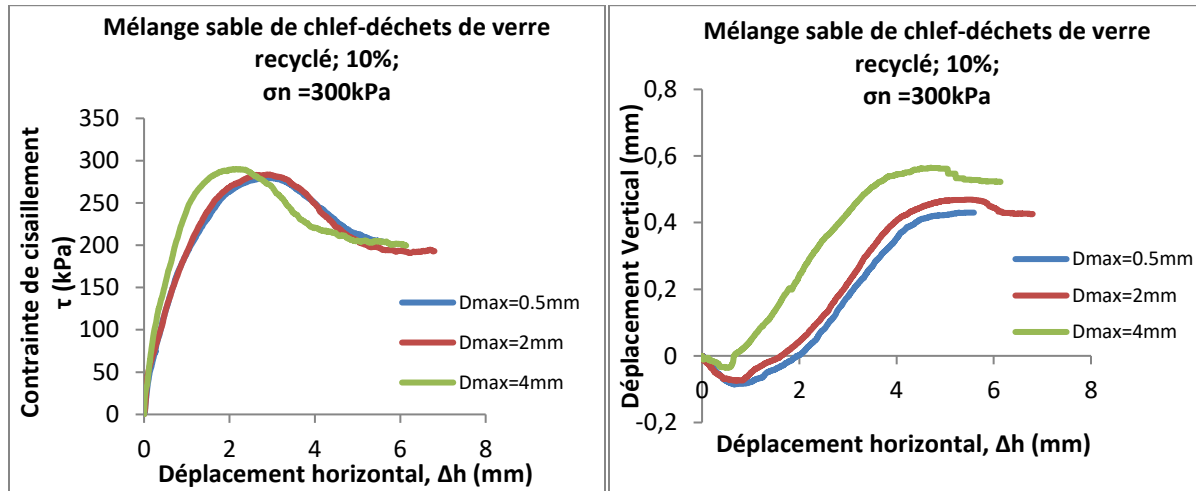
(a)

(b)

Figure 4.2 : Effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique (WRG=10% ; $\sigma_n=200$ kPa)

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

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



(a)

(b)

Figure 4.3 : Effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique (WRG=10% ; $\sigma_n=300$ kPa)

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

4.2.2. Sable de Chlef renforcé par 20% de déchets de verre recyclé ; WRG=20%

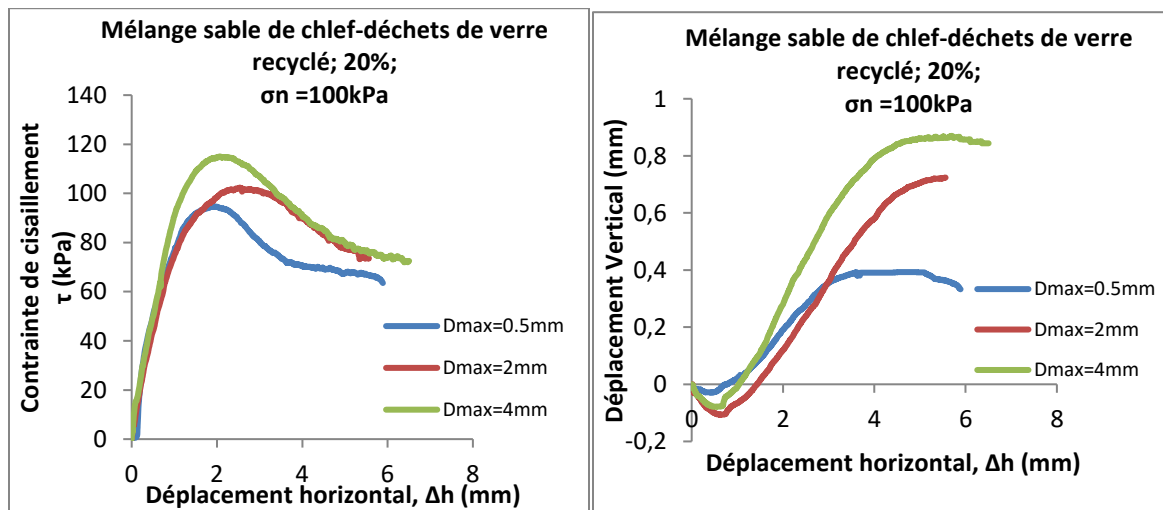
Une série d'essais de cisaillement direct a été menée en utilisant la boîte de Casagrande pour examiner l'effet de la taille des déchets de verre recyclé en terme du diamètre maximal ($D_{max}=0.5$, 2 et 4mm) sur le comportement mécanique du mélange sable de Chlef-déchets de verre recyclé. Les Figures 4.4, 4.5 et 4.6 ont été établies dans ce but. Les échantillons des mélanges sable de Chlef-déchets de verre recyclé ont été préparés en laboratoire par la méthode de pluviation à sec, avec une teneur en déchets de verre recyclé constante de 20%, à une densité relative de 90% (état dense), et soumis à trois contraintes normales initiales de 100, 200 et 300 kPa.

À partir de ces figures, il est notable que la résistance au cisaillement augmente de manière progressive avec l'augmentation du diamètre des déchets de verre recyclé pour les trois contraintes

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

normales initiales considérées. Les échantillons de sable de Chlef contenant 20% de déchets de verre recyclé avec un diamètre maximal de $D_{\max}=4$ mm montrent une augmentation de la résistance au cisaillement de 17%, 10% et 4% pour les trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa) respectivement, par rapport aux échantillons du même mélange (WRG=20%) caractérisés par un $D_{\max}=0.5$ mm, comme illustré dans les Figures 4.4a, 4.5a et 4.6a. De plus, en comparant ces résultats obtenus, il est clair que l'impact du diamètre des déchets de verre recyclé est particulièrement significatif sur la résistance au cisaillement pour la contrainte initiale la plus faible ($\sigma_n = 100$ kPa, augmentation de 17%), par rapport aux échantillons soumis aux deux autres contraintes initiales (contrainte moyenne : $\sigma_n = 200$ kPa, augmentation de 10% et contrainte élevée : $\sigma_n = 300$ kPa, augmentation de 4%).

Les Figures (3.5b, 3.6b et 3.7b) montrent la variation du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal en prenant en compte l'influence du diamètre maximal des déchets de verre recyclé. Les résultats obtenus confirment que le paramètre du diamètre maximal joue un rôle important dans l'augmentation progressive de la phase de dilatance avec l'augmentation de la taille des déchets de verre recyclé D_{\max} (0.5 mm, 2 mm et 4 mm).



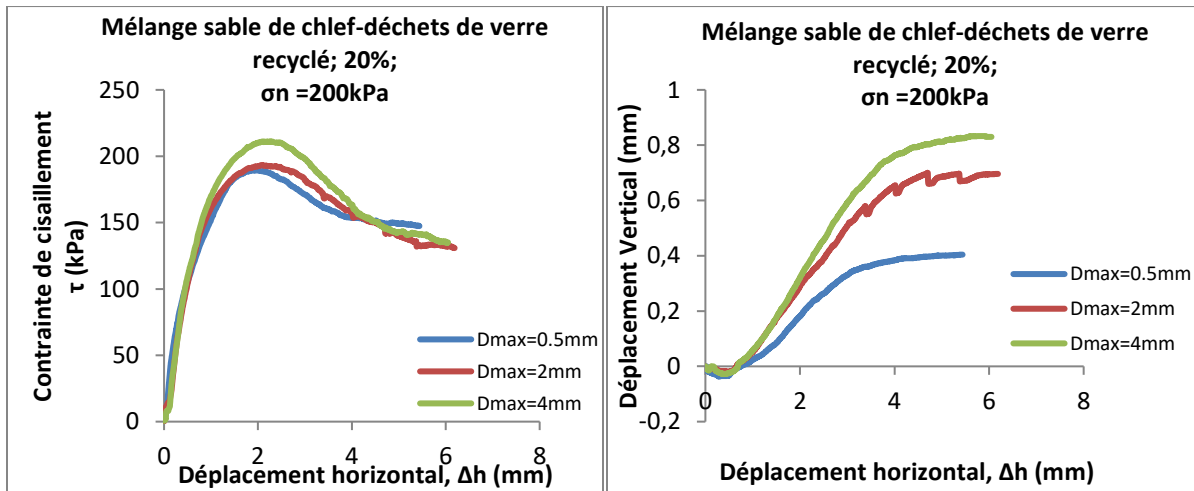
(a)

(b)

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

Figure 4.4 : Effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique
(WRG=20% ; $\sigma_n=100$ kPa)

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

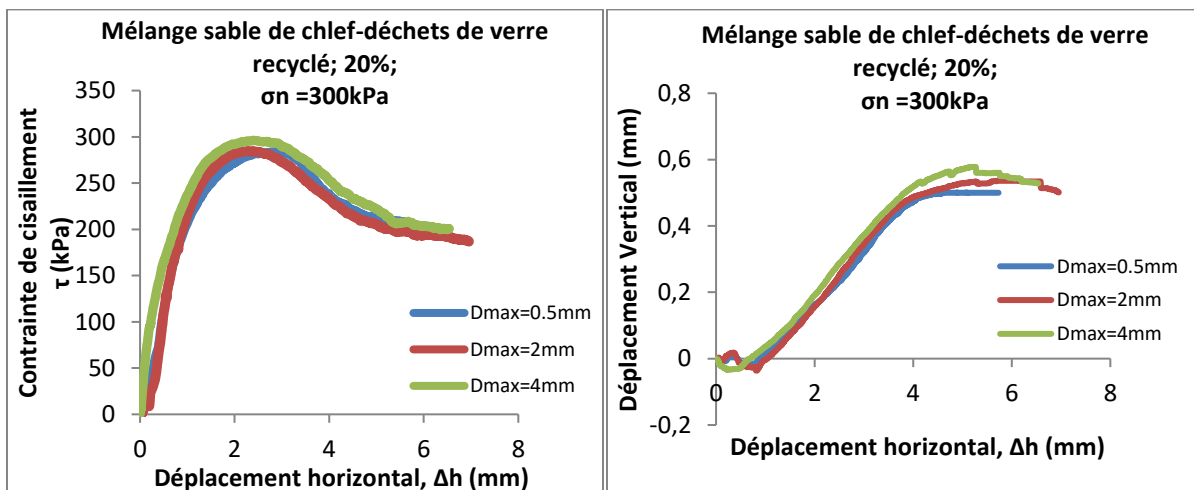


(a)

(b)

Figure 4.5 : Effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique
(WRG=20% ; $\sigma_n=200$ kPa)

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



Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

(a) (b)

Figure 4.6 : Effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique (WRG=20% ; $\sigma_n=300$ kPa)

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

4.2.3. Sable de Chlef renforcé par 30% de déchets de verre recyclé ; WRG=30%

En vue d'étudier l'impact de la taille des déchets de verre recyclé en termes de diamètre maximal ($D_{\max}=0.5$ mm, 2 mm et 4 mm) sur le comportement mécanique du sable de Chlef renforcé avec une teneur en déchets de verre recyclé de 30%, une série d'essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande a été réalisée. Les Figures (3.7, 3.8 et 3.9) ont été établies à cet effet. Les échantillons de sable renforcé ont été préparés en laboratoire par la méthode de pluviation à sec à état de densité dense ($D_r = 90\%$) et soumis à trois contraintes normales initiales de 100, 200 et 300 kPa.

Les résultats des divers essais montrent que l'augmentation du diamètre maximal des déchets de verre recyclé a un impact significatif sur la résistance au cisaillement des échantillons de ces mélanges pour les trois contraintes normales initiales considérées. Selon les Figures (4.7a, 4.8a et 4.9a), l'augmentation du diamètre maximal du verre recyclé entraîne généralement une augmentation de la résistance au cisaillement ($\tau_{\text{pic}} = 87,27, 157,88$ et $253,19$ kPa pour $D_{\max} = 0.5$ mm ; $\tau_{\text{pic}} = 107,91, 217,91$ et $285,52$ kPa pour $D_{\max} = 2$ mm ; $\tau_{\text{pic}} = 116,33, 222,38$ et $310,22$ kPa pour $D_{\max} = 4$ mm, pour les trois contraintes normales initiales sélectionnées ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa), respectivement). Cette tendance à l'augmentation de la résistance au cisaillement est attribuée à l'effet du diamètre maximal des déchets de verre recyclé qui favorise l'entrelacement (l'enchevêtrement) des particules des mélanges, conduisant ainsi à des échantillons plus stables. De plus, en comparant les résultats présentés dans les Figures (3.7a-3.9a), il est observé que l'impact du diamètre des déchets de verre recyclé est très remarquable sur la résistance au cisaillement pour la

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

contrainte initiale la plus élevée ($\sigma_n = 300$ kPa) avec un taux d'augmentation de la résistance au cisaillement de 30%, par rapport aux échantillons soumis aux deux autres contraintes initiales (contrainte normale faible : $\sigma_n = 100$ kPa avec un taux d'augmentation de 22% et contrainte normale moyenne : $\sigma_n = 200$ kPa, avec un taux d'augmentation de 23%). où, ce taux d'augmentation représente l'augmentation de la résistance au cisaillement de ces mélanges ayant un diamètre maximal de 4 mm par rapport aux mêmes mélanges préparés avec un diamètre maximal de 0.5 mm dans des conditions identiques.

Les Figures (4.7b et 4.9b) montrent l'évolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal considérant l'influence de la taille de déchets de verre recyclé du mélange de sable avec 30% de déchets de verre recyclé. Les résultats du déplacement vertical confirment les résultats de la résistance au cisaillement, montrant que l'incrément du diamètre de déchets de verre recyclé favorise l'amélioration de la phase de dilatance, conduisant ainsi à des échantillons plus stables.

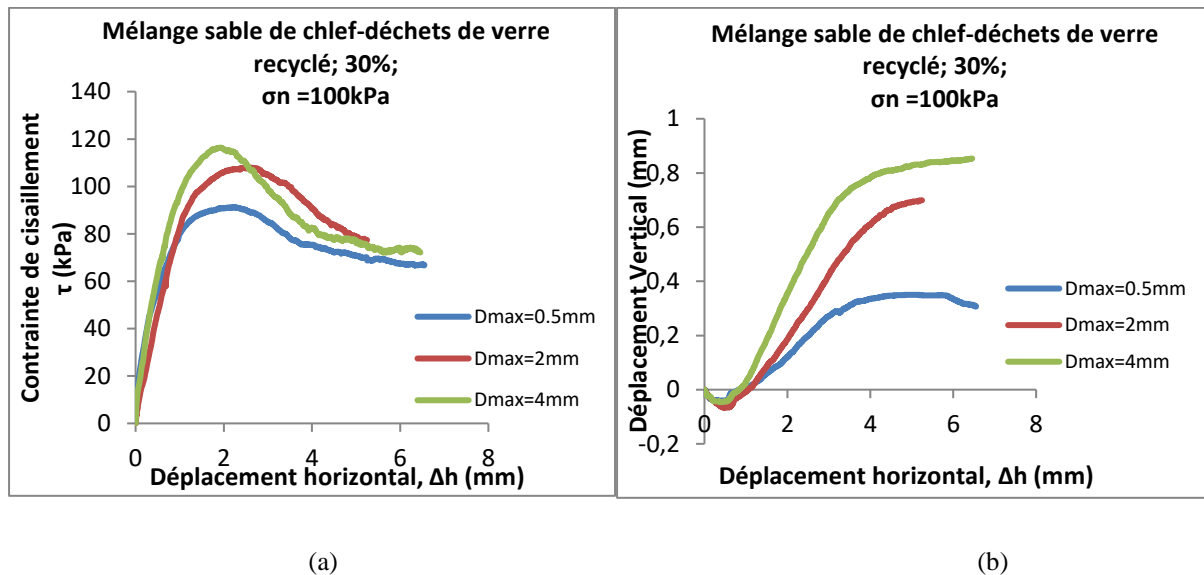
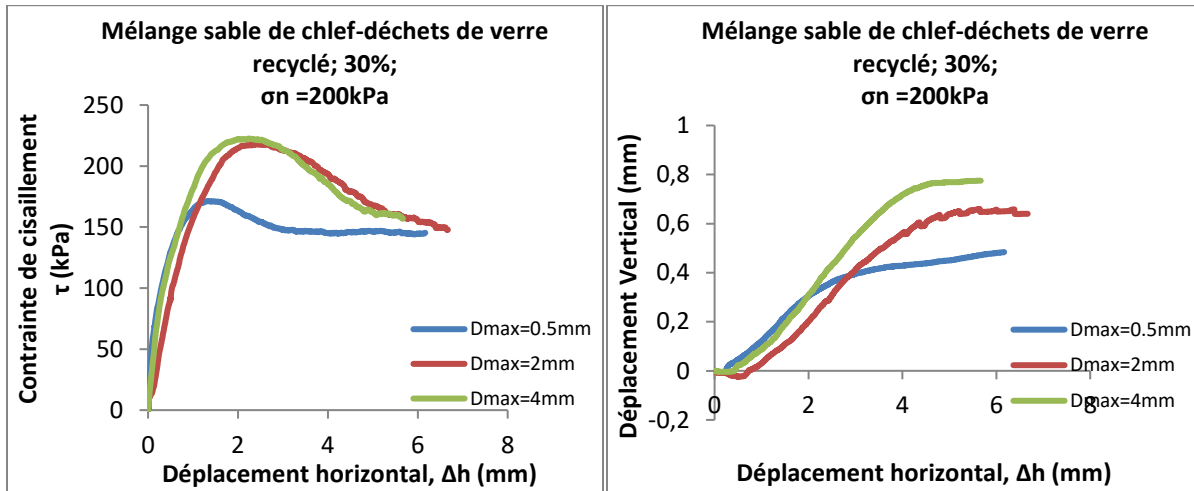


Figure 4.7 : Effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique (WRG=30%; $\sigma_n=100$ kPa)

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

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

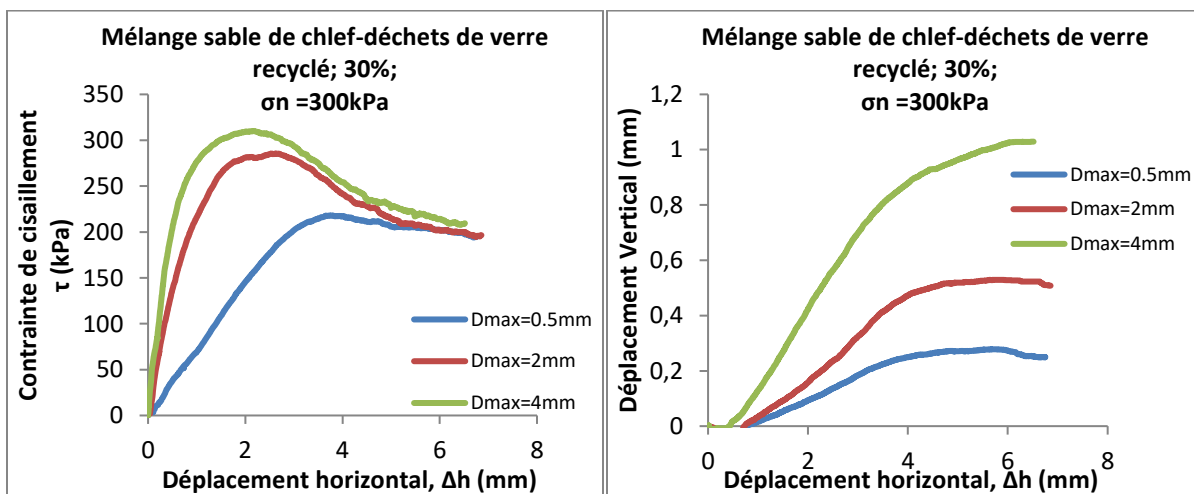


(a)

(b)

Figure 4.8 : Effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique (WRG=30% ; $\sigma_n=200$ kPa)

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



(a)

(b)

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

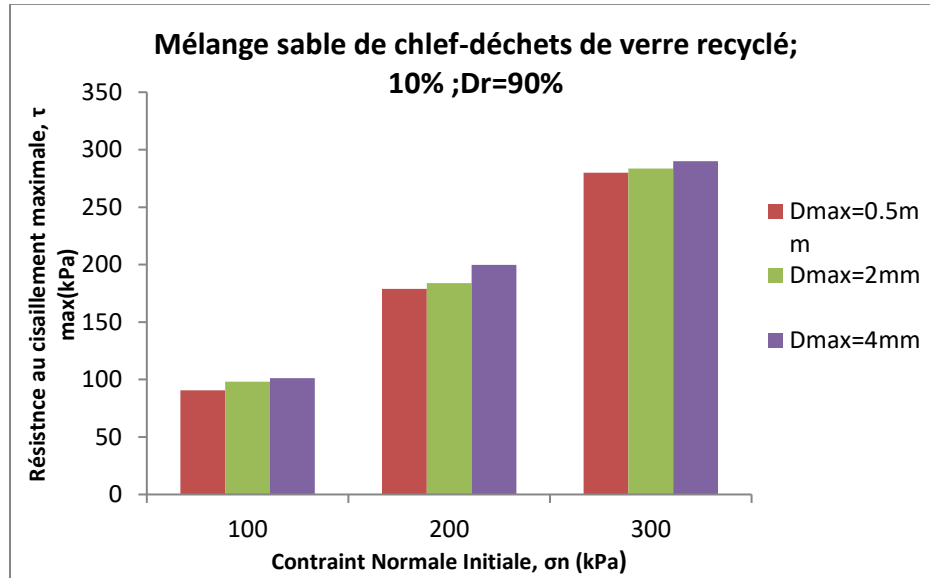
Figure 4.9 : Effet du diamètre maximal de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique
(WRG=30% ; $\sigma_n=300$ kPa)

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

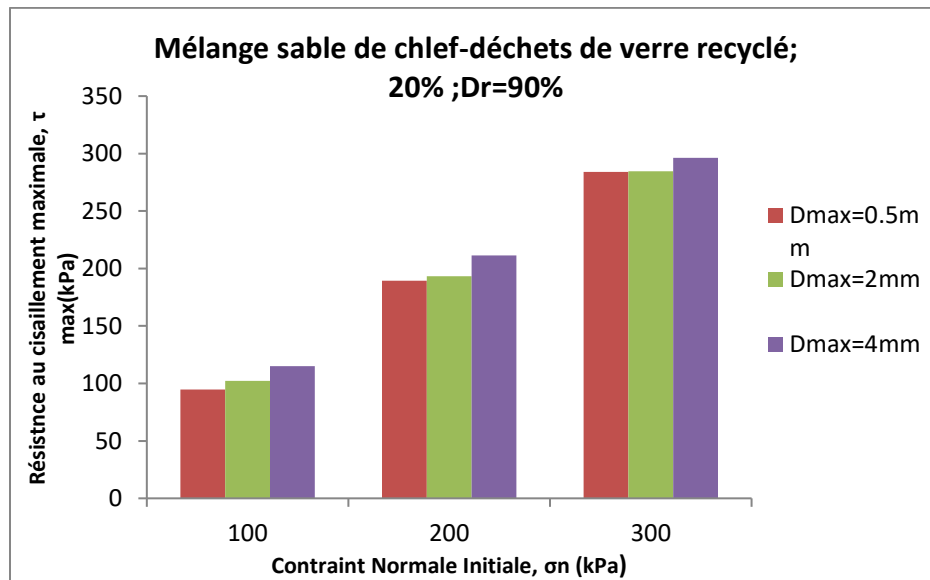
4.3. Effet la taille de déchets de verre recyclé sur la résistance au cisaillement maximale

La Figure 4.10 récapitule les résultats de comportement mécanique obtenus dans ce chapitre (Figures 4.1- 4.9), en étudiant l'influence de la taille maximale des déchets de verre recyclé sur la résistance au cisaillement maximale des mélanges sable-déchets de verre recyclé. Les échantillons ont été préparés à une densité relative initiale dense ($D_r = 90\%$) sous trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa). Les résultats montrent que la résistance au cisaillement maximale des mélanges sable-déchets de verre recyclé est significativement influencée par le diamètre maximal des déchets. En effet, une augmentation du diamètre maximal conduit à une amélioration notable de la résistance au cisaillement maximale pour toutes les fractions de déchets de verre recyclé (WRG = 10, 20 et 30%) étudiées et les trois contraintes normales sélectionnées. La tendance de l'augmentation de résistance observée est attribuable à l'augmentation du diamètre maximal, ce qui réduit le potentiel de compression des échantillons et augmente l'enchevêtrement des particules dans ces mélanges. Cette réduction du potentiel de compression entraîne une augmentation de la phase de dilatance, ce qui conduit à une structure d'échantillon plus stable. De plus, les échantillons du sable de Chlef renforcé par 10 et 20% de déchets de verre recyclé montrent que l'impact du diamètre maximal des déchets de verre recyclé est très remarquable sur la résistance au cisaillement pour les deux contraintes initiales faible et moyenne ($\sigma_n = 100$ et 200 kPa), par rapport aux échantillons soumis à la contrainte initiale élevée ($\sigma_n = 300$ kPa). Cependant, la tendance inverse a été observée pour la fraction de WRG = 30%, où l'impact du diamètre des déchets de verre recyclé (mélange sable avec 30% de déchets de verre recyclé) est très remarquable sur la résistance au cisaillement pour la contrainte initiale la plus élevée ($\sigma_n = 300$ kPa), par rapport aux échantillons soumis aux deux autres contraintes initiales (contrainte normale faible : $\sigma_n = 100$ kPa et contrainte normale moyenne : $\sigma_n = 200$ kPa).

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

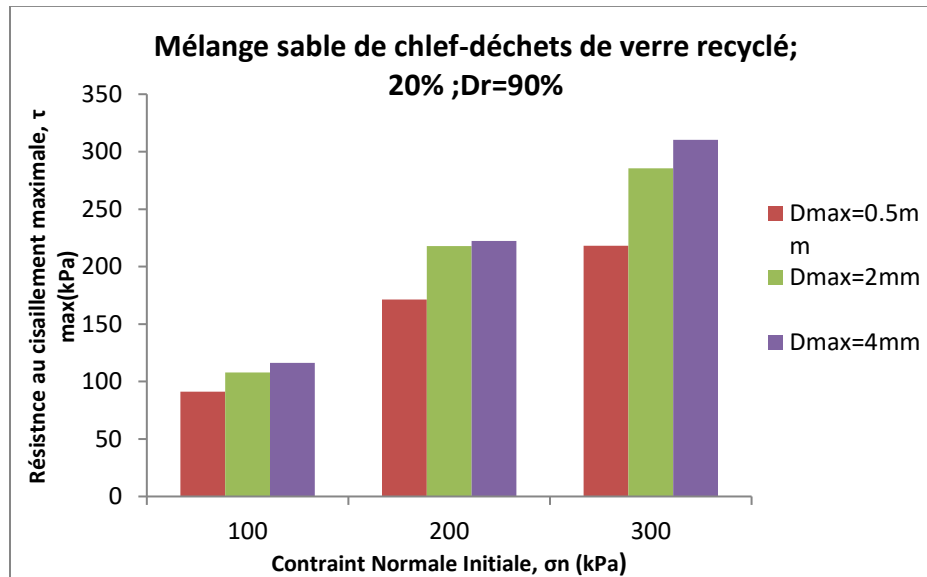


(a)



(b)

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires



(c)

Figure 4.10: Résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte normal initiale (a)- WRG=10 %, (b)-WRG=20 %, (c)-WRG=30 %

4.4. Influence de la taille de déchets de verre recyclé sur l'angle de frottement

Dans le but d'évaluer l'impact de la taille des déchets de verre recyclé, exprimée en termes de diamètre maximal ($D_{max}=0.5, 2$ et 4mm), sur l'angle de frottement (φ) des échantillons des mélanges sable de Chlef-déchets de verre recyclé. A cet effet, une série des essais de cisaillement direct a été effectué sur des échantillons des sols reconstitués au laboratoire la technique de la pluviation à sec et à un état de densité relative dense ($Dr=90\%$), la Figure 4.11 présente les résultats obtenus pour cette section. Les mélanges testés contiennent des proportions des fractions de déchets de verre recyclé varies de « WRG=10 %, 20 % et 30 % ». Les résultats montrent que l'angle de frottement augmente avec l'augmentation de la taille de déchets de verre recyclé pour les trois fractions de déchets de verre recyclé. Par exemple, l'augmentation du Dmax de 0.5 à 4 mm pour le sable de Chlef renforcé par 30% de déchets de verre recyclé entraîne une augmentation de l'angle de frottement de $37,37^\circ$ à $44,80^\circ$. De plus, il y a une corrélation très forte entre l'angle de frottement et le diamètre des déchets de verre recyclé avec un coefficient de détermination (R^2)

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

de 0,98 pour WRG= 10%, de 0,99 pour WRG= 20% et de 0,94 pour de 0,98 pour WRG= 30%. Par conséquent, une relation logarithmique a été proposée pour exprimer l'angle de frottement (ϕ) en fonction du diamètre des déchets de verre recyclé (D_{max}) pour les trois fractions de WRG considérées.

$$(\phi) = A \times (WRG)^2 + B \times (WRG) + C \quad (4.1)$$

Illustre les coefficients A, B, C et coefficient de détermination (R^2) pour les matériaux testés.

Tableau 4.1 : Coefficients A, B, C et R^2 pour équation (4.1)

Matériaux testés	Classes granulaires	A	B	C	R^2
WRG (%)	0.5 mm	-0,0121	0,302	39,432	0,8721
	2 mm	-0,006	0,3175	39,817	0,9624
	4 mm	-0,0077	0,3937	39,806	0,9767

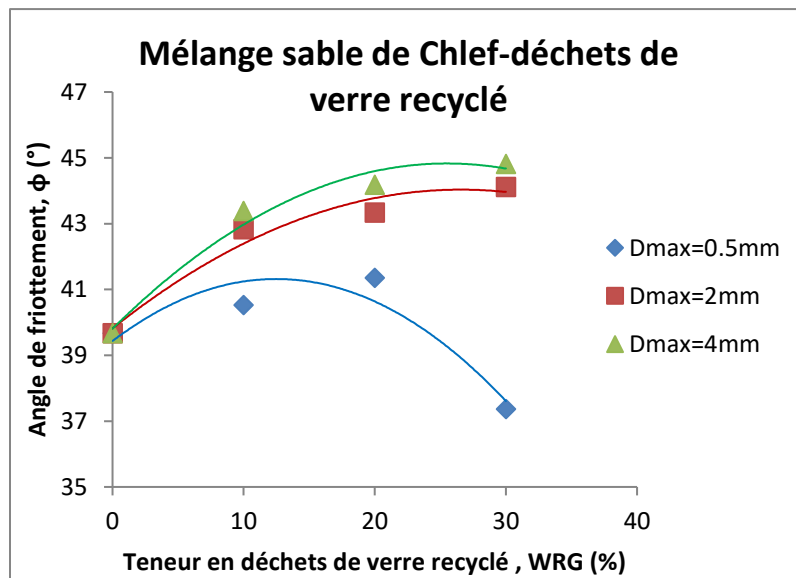


Figure 4.11: Angle de frottement en fonction de Teneur en déchets de verre recyclé, WRG (%)

4.5. Conclusion

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

Dans ce chapitre, des essais de cisaillement direct ont été menés pour le but d'étudier l'impact de la taille des déchets de verre recyclé, exprimée en termes de diamètre maximal, sur le comportement mécanique des échantillons de sable de Chlef renforcés par trois fractions de déchets de verre recyclé (WRG = 10 %, 20 % et 30 %). Les échantillons de sable, préparés en laboratoire avec des diamètres extrêmes constants ($D_{\max} = 2$ mm et $D_{\min} = 0,08$ mm), ont été mélangés avec des déchets de verre recyclé de différents diamètres maximaux ($D_{\max} = 0,5, 2$ et 4 mm) avec même diamètre minimal ($D_{\min} = 0,08$ mm). Les différents mélanges ont été soumis à trois niveaux de contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa) avec une densité initiale dense ($D_r = 90\%$). En analysant les résultats expérimentaux obtenus, plusieurs conclusions peuvent être déduites.

Les résultats des essais de cisaillement direct montrent que la dimension des déchets de verre recyclé (D_{\max}) contrôle de manière très significative la réponse mécanique des mélanges de sable de Chlef et de déchets de verre recyclé, notamment en ce qui concerne la résistance au cisaillement maximale et l'angle de frottement.

Les résultats des essais de cisaillement direct montrent que l'augmentation du diamètre maximal des déchets de verre recyclé entraîne une amélioration significative de la résistance au cisaillement maximale et l'angle de frottement et, par conséquent, une augmentation importante de la phase de dilatance, et ce pour toutes les fractions de déchets de verre recyclé (WRG = 10%, 20% et 30%) étudiées et les trois niveaux de contrainte normale sélectionnés.

Les résultats trouvés montrent que les échantillons de sable de Chlef renforcés par 10 et 20% de déchets de verre recyclé démontrent que l'effet du diamètre maximal des déchets de verre recyclé est très notable sur la résistance au cisaillement pour les deux contraintes initiales faible et moyenne ($\sigma_n = 100$ et 200 kPa), par rapport aux échantillons soumis à la contrainte initiale élevée ($\sigma_n = 300$ kPa). Cependant, la tendance inverse a été observée pour la fraction de WRG = 30%, où l'impact du diamètre des déchets de verre recyclé (mélange de sable avec 30% de déchets de verre recyclé) est très remarquable sur la résistance au cisaillement pour la contrainte initiale la

Chapitre 04: Effet de la taille des particules de déchets de verre recyclé sur la réponse mécanique des sols granulaires

plus élevée ($\sigma_n = 300$ kPa), par rapport aux échantillons soumis aux deux autres contraintes initiales (contrainte normale faible : $\sigma_n = 100$ kPa et contrainte normale moyenne : $\sigma_n = 200$ kPa).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude expérimentale est d'examiner en détail l'impact de l'incorporation de déchets de verre recyclé sur le comportement mécanique des échantillons de sable de Chlef reconstitués par la méthode de pluviation à sec. Trois catégories de déchets de verre recyclé, caractérisées par leur diamètre maximal ($D_{\max}=0,50$ mm, 2.00 mm et 4.00 mm), ont été utilisées. Les proportions de déchets de verre recyclé ajoutées aux échantillons de sable variaient de 0 % à 30 %, avec des incréments de 10 %. Les échantillons ont été soumis à trois niveaux de contraintes normales initiales ($\sigma_n=100$ kPa, 200 kPa et 300 kPa) avec une densité initiale dense ($D_r=90$ %). Cette étude permet également d'analyser les effets de la taille des particules sur le comportement mécanique des mélanges de sable de Chlef-déchets de verre recyclé. Les conclusions de ce chapitre sont détaillées ci-dessous :

1. Les essais sur différents mélanges ont montré que l'incorporation de déchets de verre recyclé améliore de manière notable les caractéristiques du sable de Chlef, notamment sa résistance maximale au cisaillement, sa résistance au cisaillement normalisée et son angle de frottement. De plus, les déchets de verre recyclé constituent un paramètre pertinent pour améliorer la résistance au cisaillement des sols sableux. En effet, une augmentation de la proportion de ces déchets entraîne une amélioration du comportement mécanique en termes de résistance au cisaillement et d'angle de frottement.
2. Les échantillons de sable renforcés avec des déchets de verre de ($D_{\max}=0,50$ mm) voient leurs résistances au cisaillement et angle de frottement augmenter avec la quantité de déchets jusqu'à 20%. Au-delà, ces paramètres diminuent pour les mélanges contenant plus de 20% de déchets. En revanche, pour les tailles de particules de déchets de verre ($D_{\max}= 2.00$ et 4.00 mm), les propriétés mécaniques s'améliorent continuellement avec l'ajout de 0 à 30% de déchets de verre recyclé, et ce pour les trois contraintes normales initiales testées (100, 200 et 300 kPa).
3. L'influence du diamètre maximal (D_{\max}) des déchets de verre recyclé sur la résistance au cisaillement des mélanges de sable de Chlef dépend de deux facteurs : la proportion de WRG incorporée et le niveau de contrainte normale initiale appliquée. Lorsque le WRG représente 10 à 20% du mélange, son diamètre a un impact majeur sur la résistance au cisaillement pour des contraintes initiales faibles à moyennes (100-200 kPa), mais cet impact diminue sous une forte contrainte (300 kPa). En revanche, quand la fraction de WRG atteint 30%, c'est spécifiquement pour la

Conclusion générale

contrainte initiale élevée (300 kPa) que le diamètre des déchets de verre recyclé affecte grandement la résistance au cisaillement, alors que cet effet est moindre à plus faibles contraintes.

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

1. Explorer l'influence des méthodes de préparation des échantillons en reproduisant le même programme expérimental avec différentes techniques de préparation. Cela permettrait d'évaluer dans quelle mesure ces méthodes affectent les résultats obtenus.
2. Mener une étude approfondie sur l'impact des teneurs en déchets de verre recyclés sur le comportement mécanique de sable de Chlef, en réalisant des essais triaxiaux statiques et cycliques pour tous les paramètres étudiés. Cette démarche vise à acquérir une compréhension plus complète des propriétés mécaniques des mélanges sable-déchets de verre recyclé dans des conditions de chargement plus complexes.

Références bibliographiques

1. **Bayat M. & Bayat E & Aminpour H & Salarpour A (2012)** "Shear strength and pore waterpressure characteristics of sandy soil mixed with plastic fine" DOI 10.1007/s12517-012-07539.
2. **Belkhatir .M, Arab, A. Schanz,T, Missoum, H, Della, N [2011]** "Laboratory study on the liquefaction resistance of sand-silt mixtures: effect of grading characteristics", Granular Matter (2011) 13:599–609.
3. **Blayia Rizgar A, Sherwania Aryan Far H, Hawkar Hashim Ibrahim, Rabar H.Farajc, Ako Daraeia (2020)** "Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder", BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)
4. **Bouchibane et Ben Abdelmoutaaleb (2020)** "Etude en laboratoire de la réponse mécanique du sable de Chlef : impact des différents types des fines ". Université Hassiba Ben bouali de Chlef
5. **Cabalar Ali Firat et Demir Suleyman (2020)** "Geotechnical properties of a bentonite treated with waste glass grains» (<https://www.researchgate.net/publication/360263830>)
6. **Cherif Taiba, A. (2017)** "Etude en laboratoire de la susceptibilité à la liquéfaction de Sable limoneux : Influence de la forme et taille des grains ", thèse de doctorat, Université de Chlef, Algérie.
7. **Cherif Taiba A, Mahmoudi Y, Belkhatir M, et Schanz T,(2018)** "Experimental Investigation into the Influence of Roundness and Sphericity on the Undrained Shear Response of Silty Sand Soils
8. **Disfani, M. M., Arulrajah, A., Bo, M. W., & Hankour, R. J. W. M. (2011).** Recycled crushed glass in road work applications. Waste management, 31(11), 2341-2351.
9. **Disfani, M. M., Arulrajah, A., Bo, M. W., & Sivakugan, N. (2012).** Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications. Journal of Cleaner Production, 20(1), 170-179.
10. **Hazout, L, Zitouni, Z.A, Belkhatir.M & Schanz, T(2017)** "Evaluation of static liquefaction characteristics of saturated loose sand through the mean grain size and extreme grain sizes" geotechnical and geological engineering an international journal, doi 10.1007/s10706-017 0230-z.
11. **Islam, M. N, Siddika, A. Hossain, M. B. Rahman, and Asad, M. A. (2011)** "Effect of particle size on the shear strength of sand," Australian Geomechanics, vol. 46, no. 3

12. **Javed Syed Aaqib et Sudipta Chakraborty, (2020)** "Effects of Waste Glass Powder on Subgrade Soil Improvement " <https://bibliotekanauki.pl/articles/1030256.pdf>
13. **Kermatikeman M, Chegenizadeh A, Nikraz H et Ayad Salih Sabbar (2017)**, "Experimental study on effect of fly ash on liquefaction resistance of sand" DOI.org/10.1016/j.soildyn.2016.11.012
14. **Liu, Y, N, Gang Li , Yin, Z. Y, Dano, D, Hicher, P.Y , Xia, X.H , Wang, J.H. [2014]** "Influence of grading on the undrained behavior of granular materials". Comptes Rendus Mecanique. DOI.org/10.1016/j.crme.2013.11.001
15. **Merni et Elezaar (2019)** "Etude expérimentale de la réponse mécanique d'un mélange sable cendre volante : Influence de la taille des grains", Mémoire master 2 géotechnique. Université Hassiba Benbouali de Chlef.
16. **Mohammad Ali Mohammadzadeh , Mohammad Mohsen Toufigh et Vahid Toufigh (2022)**, "Durability and Strength of Geopolymer with Recycled Glass Powder Base for Clay Stabilization", KSCE Journal of Civil Engineering DOI 10.1007/s12205-022-0681-5
17. **Prashanth Vangla, Gali Madhavi Latha [2015]** "Influence of Particle Size on the Friction and Interfacial Shear Strength of Sands of Similar Morphology"; nt. J. of Geosynth. and Ground Eng. 1:6 DOI 10.1007/s40891-014-0008-9.
18. **Wang, J., J., Zhang, H., P., Tang, C.,C., Liang, Y. (2013)** "Effects of Particle Size Distribution on Shear Strength of Accumulation Soil." journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 139, No. 11.
19. **Zaid AbdulZahra Mahdi et Noor S. Al-Hassnawi (2018)** "Assessment of Subgrade Soil Improvement By Waste Glass Powder" Article ID : IJCIET_09_10_002.
20. **Zitoufi Sarra et Louri Hassina, (2020)** "Etude expérimentale de l'influence de la teneur en poudre de verre sur la résistance au cisaillement des sols granulaires", Mémoire master 2 géotechnique. Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.