

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

Présenté par
KOBZILI Djihad

Thème

Etude expérimentale sur l'impact du diamètre moyen sur la résistance au cisaillement des mélanges sables-granules de caoutchouc

Soutenue le 25/06/2025 , devant le jury composé de:

Dr Mekkakia M Grade Université Hassiba Benbouali de Chlef Président
Dr Cherif Taïba Abdellah Grade Université Hassiba Benbouali de Chlef Examineur
Dr Mahmoudi Youcef Grade Université Hassiba Benbouali de Chlef Encadrant

Promotion : 2024/2025

Remercîments

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon encadrant, le **Dr Mahmoudi Youcef** pour sa supervision rigoureuse, ses précieux conseils et son soutien constant, qui ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements au **Dr Cherif Taïba Abdellah** pour ses orientations scientifiques pertinentes et ses remarques constructives, qui ont joué un rôle essentiel dans le développement de ce projet.

Je remercie aussi **Dr. Megrouse Mohamed** pour son aide précieuse, son encouragement constant et son esprit de collaboration.

A Chacun de vous, je dis merci du fond du cœur pour votre soutien et votre confiance, qui ont eu un impact profond sur l'atteinte des objectifs de cette recherche et sur l'enrichissement de mes connaissances dans ce domaine

الاهداء:

بسم من قال لعبده الامي اقرا بسم من قال في محكم تنزيله " و قل بي زوني علما" احمدك بي حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه فلك الحمد حتى يبلغ الحمد منتهاه و صلي اللهم و سلم و بارك على سيد الخلق و حبيب القلب محمد صلى الله عليه و سلم اما بعد :

الى سندي الاول يا من لم تجن بشيء من اجلي كنت دائما القدوة التي افتخر بها و دروسك في الحياة كانت الدافع لي لأصل لهذا اليوم يا من علمتني معنى الصبر و الاصرار كنت مصدر القوة في كل لحظة ضعف , ابي الغالي جبر الله قلبي بلقياسك في لجنة كان شرفا لي حمد اسمك و النجاح وانا وبتك اليك اهدي هذا النجاح .

الى ثمرة الخير و التضحية و العطاء اللامحدود الى التي ساندت رحلتي بعد رحيل الغالي لا كلمات تنصفك ولا شيء يعني بحققك لك اهدي تحزبي يا امي .
الى من جاء علي بوفته و اكرمني بفضله سندي و شريك عمري , زوجي الحبيب , هذا الانجاز لم يكن ليري النور لولا وقوفك لي جانبي , بكلمة تشجيع , دعوة صادقة , و حب لا يقدر بثمن , اهديك تحزبي فرا بك و امتنانا لك فانت النجاح الحقيقي في حياتي و المعجزة التي انت لتعلم شتائي .
الى مصدر قوتي الداعمين الساندين لي خيرة ايامي و صفوحها لي ضلعي الثابت و امان ايامي من جاءت بعدي مؤنسة لوحدي اسيما بحجة بيتنا و نوره عبد الباقي , اخر العنقود و بلسم ايامنا حليلة .

الى رفيقات الدرب و صاحبات القلب , كنتن الضوء في ايامي المظلمة و الضحكة في لحظات التعب شاركتمني كل التفاصيل من السهر و التوتر الى الفرح و النجاح اهديكم و بذكر اسمائكم زليخة (زوزو) , فطيمة , مريم , مروى و مريم هذا النجاح .

SOMMAIRE

ABSTRACT	I
RESUME	II
الملخص	III
LISTE DES SYMBOLES	IV
Introduction générale	1

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Introduction	5
1.2. Généralités sur l'influence de la taille des grains et la teneur en granules de caoutchouc sur le comportement mécanique des sols	5
1.2.1 Taille des grains	5
1.2.2 Teneur en granule de caoutchouc	8
1.3 Influence de quelques paramètre sur le comportement mécanique des sols	12
1.3.1 Densité relative	12
1.3.2. Effet de la forme des particules	12
1.3.3 Contrainte initiale	14
1.4 Conclusion	16

CHAPITRE 2
DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET MODE
OPERATOIRE

2.1. Introduction	19
2.2. Dispositif expérimental.....	19
2.2.1. Introduction	19
2.2.2. But de l'essai	19
2.2.3. Eléments constituant la boîte de cisaillement	20
2.2.4.Principe de l'essai de cisaillement.....	21
2.2.5. Détermination des caractéristiques mécaniques du sol	22
2.3. Matériaux des testés.....	23
2.4. Procédure de l'essai	28
2.4.1. Introduction	28
2.4.2. Reconstitution des échantillons	28
2.4.3. Exécution de l'essai	29
2.4.4. Traitement des résultats	29
2.5. Lecteurs	30
2.5. Conclusion	30

CHAPITRE 3

IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULENT DE CAOUTCHOUC

3.1. Introduction	32
3.2 Résultats des essais de cisaillement	33
3.2.1 Contrainte normale initial, $\sigma_n=100$ kPa	33
3.2.2 Contrainte normale initiale, $\sigma_n=200$ kPa	36
3.2.3 Contrainte normale initiale, $\sigma_n=400$ kPa	40
3.3. Effet de diamètre moyen (D_{50}) sur la résistance au cisaillement maximale des mélanges sable-granulés de caoutchouc	44
4.4. Influence du diamètre moyen des grains sur l'angle de frottement	46
3.5 Conclusion	48

CHAPITRE 4 :

EFFET DE L'INCORPORATION DE DE TENEUR EN GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPONSE MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES

4.1. Introduction	51
4.2. Résultats des essais réalisés	52
4.2.1. Diamètre moyen ; $D_{50}=3.15$ mm	52
4.2.2. Diamètre moyen ; $D_{50}=2$ mm	55
4.2.3. Diamètre moyen ; $D_{50}=1$ mm	57
3.3. Effet de la fraction de granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement maximale	59
4.4. Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement normalisée	61
4.5. Effet de la teneur en granules de caoutchouc sur l'angle de frottement	62
4.6 Conclusion	63

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 2 :

Tableau 2.1: Propriétés physiques du sable dune et concassé 27

Tableau 2.2 : Les masses calculées pour les échantillons testés 29

CHAPITRE 3 :

Tableau 3.1 : Coefficients a, b et R^2 pour équation (3.1)..... 48

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1.1 : Influence des diamètres (D_{10} , D_{50}) sur la résistance cyclique d'un sable limoneux Belkhatir et al. (2011)	6
Figure 1.2: Influence du 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 1.3 : Variation de l'angle de frottement interne selon la taille moyenne des grains et la proportion de fibres de doum, Megrousse et al. (2024).....	7
Figure 1.4: L'angle de frottement interne des matériaux testés varie : a- angle de frottement interne par rapport à D_{50} , b- angle de frottement interne par rapport à la teneur en CWG Megrousse et al. (2025)	8
Figure 1.5: (a) Variations de l'angle de frottement interne avec la teneur en caoutchouc granulé à diverses densités relatives, et (b) enveloppes de contrainte de cisaillement pour des spécimens Avec différentes teneurs en caoutchouc granulé ($D_r = 50\%$). (Anvari et al. 2017)	9
Figure 1.6: Angle de frottement maximum en fonction de la teneur en caoutchouc granulé. (Sung et al.2022)	10
Figure 1.7: Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;($\sigma_n = 100$ kPa) Dah et Vadel cheikh (2024).....	11
Figure 1.8: Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;($\sigma_n = 200$ kPa) Dah et Vadel cheikh (2024).....	11
Figure 1.9: Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;($\sigma_n = 400$ kPa) Dah et Vadel cheikh (2024)	11
Figure 1.10: Influence de la densité relative sur le comportement mécanique des sables (a)- Sable d'Hostun, (b)-Sable de Chlef Arab et al. (2010)	12

Figure 1.11 : Résistance au cisaillement non drainé au pic versus les caractéristiques de forme des grains Cherif Taïba et al (2018)	13
Figure 1.12 : Effet de régularité globale sur le comportement mécanique des mélanges. Xiao et al. (2019).....	14
Figure 1.13 : Effet de la teneur en billes EPS sur la résistance au cisaillement. Zhu et al. (2008)	15
Figure 1.14: Effet de la contrainte normale sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ($D_{min}= 0.08$ mm) (a)- FB=0 % (b)-FB=10 % (c)- FB=20 % (d)-FB=30 % « Mokhtari et Medjahdi (2021) »	16

CHAPITRE 2

Figure 2.1 : Appareil de cisaillement utilisé dans cette étude	19
Figure 2.2: Composants de la boîte de cisaillement direct	20
Figure 2.3: Les accessoires de la boîte de cisaillement	21
Figure 2.4 : Plan de la contrainte normale (σ) et de la contrainte tangentielle (τ)	22
Figure 2.5 : courbe intrinsèque des sols	23
Figure 2.6 : Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale	24
Figure 2.7: Courbes granulométriques des matériaux utilisés	25
Figure (2.8) : Les variations des indices de vides en fonction de la teneur en caoutchouc	2

CHAPITRE 3

Figure 3.1: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=0\%$, $\sigma_n=100$ kPa). (a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale	34
--	----

Figure 3.2: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=2.5\%$, $\sigma_n=100$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale 35

Figure 3.3: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=5\%$, $\sigma_n=100$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale 35

Figure 3.4: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=7.5\%$, $\sigma_n=100$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale 36

Figure 3.5: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=10\%$, $\sigma_n=100$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale 36

Figure 3.6: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=0\%$, $\sigma_n=200$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale 38

Figure 3.7: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=2.5\%$, $\sigma_n=200$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale 38

Figure 3.8: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=5\%$, $\sigma_n=200$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale 39

Figure 3.9: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=7.5\%$, $\sigma_n=200$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale 39

Figure 3.10: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=10\%$, $\sigma_n=200$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale	40
Figure 3.11: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=0\%$, $\sigma_n=400$ kPa).	
(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale	41
Figure 3.12: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=2.5\%$, $\sigma_n=400$ kPa).	
(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale	42
Figure 3.13: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=5\%$, $\sigma_n=400$ kPa). (a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale.....	
	42
Figure 3.14: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=7.5\%$, $\sigma_n=400$ kPa). (a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale.....	
	43
Figure 3.15: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=10\%$, $\sigma_n=400$ kPa). (a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale.....	
	43
Figure 3.16: Effet de D_{50} sur la résistance au cisaillement maximale (a) – $\sigma_n=100$ kPa, (b) - $\sigma_n=200$ kPa, (c) - $\sigma_n=400$ kPa.....	
	46
Figure 3.17: Effet de D_{50} sur l'angle de frottement.....	
	47
Figure 3.18: Coefficients a, b et R^2 pour équation (3.1).....	
	48

CHAPITRE 4

Figure 4.1: Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=3.15$ mm ; $\sigma_n=100$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	
	53

Figure 4.2: Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=3.15$ mm ; $\sigma_n=200$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	54
Figure 4.3: Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=3.15$ mm ; $\sigma_n=400$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	54
Figure 4.4: Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=2$ mm ; $\sigma_n=100$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	56
Figure 4.5 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=2$ mm ; $\sigma_n=200$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	56
Figure 4.6 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=2$ mm ; $\sigma_n=400$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	57
Figure 4.7 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=1$ mm ; $\sigma_n=100$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	58
Figure 4.8 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=1$ mm ; $\sigma_n=200$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	59
Figure 4.9 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=1$ mm ; $\sigma_n=400$ kPa) (a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical	59
Figure 4.10: Résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte normale initiale	

(a)-Mélange sable de Chlef de $D_{50}=1\text{mm}$ -granulés de caoutchouc, (b)- Mélange sable de $D_{50}=2\text{mm}$ -granulés de caoutchouc, (c) Mélange sable de $D_{50}=3.15\text{mm}$ -granulés de caoutchouc 61

Figure 4.11: Impact de la teneur en granulés de caoutchouc sur résistance au cisaillement normalisée (τ_{\max}/σ_n) des mélanges étudiés 62

Figure 4.12 : Angle de frottement en fonction de teneur en granulés de caoutchouc pour les matériaux étudiés 63

ABSTRACT

The stability of granular soils, crucial in geotechnical engineering, can be significantly improved by the addition of recycled materials, particularly rubber granules. However, combined effects of the average sand particle diameter (D_{50}) and rubber content on the mechanical behavior of these mixtures remain poorly explored. This experimental study aims to evaluate the influence of these two parameters on the shear strength of sand–rubber mixtures, using direct shear tests with the Casagrande box. Three sand particle sizes ($D_{50} = 1$ mm, 2 mm and 3.15 mm) were mixed with five proportions of recycled rubber granules (0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10%), then subjected to three levels of normal stress (100, 200 and 400 kPa) at a high relative density ($D_r = 90\%$). The results reveal that increasing the average sand grain diameter significantly improves the maximum shear strength, the angle of internal friction as well as the dilatancy, with a particularly marked effect under low normal stress. At the same time, the incorporation of rubber granules strongly influences the mechanical behavior of the mixtures, with a maximum improvement in strength observed for an optimal content of 5%, beyond which a decrease is observed. An exponential relationship was identified between the friction angle and the average diameter, while the beneficial effect of granules was more pronounced under normal stress (200 kPa). These results confirm on the combined role of grading and rubber addition in strengthening granular soils and open up promising prospects for their use in soil improvement in sustainable civil engineering projects.

KEY WORDS: Granular soil, rubber granules, shear strength, average diameter (D_{50}), internal friction angle.

RESUME

La stabilité des sols granulaires, cruciale en ingénierie géotechnique, peut être significativement améliorée par l'ajout de matériaux recyclés, notamment les granulés de caoutchouc. Toutefois, les effets conjoints du diamètre moyen des particules de sable (D_{50}) et de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique de ces mélanges restent peu explorés. Cette étude expérimentale vise à évaluer l'influence de ces deux paramètres sur la résistance au cisaillement de mélanges sable– granulés caoutchouc, en utilisant des essais de cisaillement direct à l'aide de la boîte de Casagrande. Trois classes granulométriques de sable ($D_{50} = 1 \text{ mm}$, 2 mm et $3,15 \text{ mm}$) ont été combinées à cinq proportions de granulés de caoutchouc recyclé (0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % et 10 %), puis soumises à trois niveaux de contraintes normales (100, 200 et 400 kPa) à une densité relative élevée ($D_r = 90 \%$). Les résultats révèlent que l'augmentation du diamètre moyen des grains de sable améliore significativement la résistance maximale au cisaillement, l'angle de frottement interne ainsi que la dilatance, avec un effet particulièrement marqué sous faible contrainte normale. Parallèlement, l'incorporation de granulés de caoutchouc influence fortement le comportement mécanique des mélanges, avec une amélioration maximale de la résistance observée pour une teneur optimale de 5 %, au-delà de laquelle une diminution est constatée. Une relation exponentielle a été identifiée entre l'angle de frottement et le diamètre moyen, tandis que l'effet bénéfique des granulés s'avère plus prononcé sous une contrainte normale (200 kPa). Ces résultats apportent un éclairage nouveau sur le rôle couplé de la granulométrie et de l'ajout de caoutchouc dans le renforcement des sols granulaires, et ouvrent des perspectives prometteuses pour leur utilisation en amélioration des sols dans les projets de génie civil durable.

MOTS CLES : Sol granulaire, granulés de caoutchouc, résistance au cisaillement, diamètre moyen (D_{50}), l'angle de frottement interne.

التلخيص

يمكن تحسين استقرار التربة الحبيبية، وهو أمر بالغ الأهمية في الهندسة الجيوتقنية، بشكل ملحوظ بإضافة مواد مُعاد تدويرها، وخاصةً حبيبات المطاط. ومع ذلك، لا تزال آثار تقاطع متوسط قطر جسيمات الرمل (D_{50}) ومحتوى المطاط على السلوك الميكانيكي لهذه الخلطات غير مستكشفة بشكل كافٍ. تهدف هذه الدراسة التجريبية إلى تقييم تأثير هذين العاملين على قوة القص لمخاليط الرمل والمطاط، باستخدام اختبارات القص المباشر باستخدام صندوق كاساجراندي. جُمعت ثلاثة أحجام لجسيمات الرمل ($D_{50} = 1$ مم، 2 مم، و3.15 مم) مع خمس نسب من حبيبات المطاط المُعاد تدويرها (0%، 2.5%، 5%، 7.5%، و10%)، ثم خضعت لثلاثة مستويات من الإجهاد الطبيعي (100، 200، و400 كيلو باسكال) بكثافة نسبية عالية ($Dr = 90\%$). تكشف النتائج أن زيادة متوسط قطر حبيبات الرمل تُحسن بشكل ملحوظ أقصى قوة قص، وزاوية الاحتكاك الداخلي، بالإضافة إلى التمدد، مع تأثير ملحوظ بشكل خاص تحت إجهاد طبيعي منخفض. في الوقت نفسه، يؤثر دمج حبيبات المطاط بشدة على السلوك الميكانيكي للخلائط، مع ملاحظة أقصى تحسن في القوة عند محتوى أمثل بنسبة 5%، وبعد ذلك يُلاحظ انخفاض. تم تحديد علاقة أسية بين زاوية الاحتكاك ومتوسط القطر، بينما كان التأثير الإيجابي للحبيبات أكثر وضوحًا تحت إجهاد طبيعي متوسط (200 كيلو باسكال). تُلقى هذه النتائج ضوءًا جديدًا على الدور المشترك للتسوية وإضافة المطاط في تقوية التربة الحبيبية وفتح آفاقًا واعدة لاستخدامها في تحسين التربة في مشاريع الهندسة المدنية المستدامة.

الكلمات المفتاحية: تربة حبيبية، حبيبات مطاطية، قوة القص، متوسط القطر (D_{50})، زاوية الاحتكاك الداخلي.

LISTE DES SYMBOLES

A	Surface corrigée de la section cisailée (mm ²)
C	Cohésion
C_c	Coefficient de Courbure, $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \cdot D_{60})$
C_u	Coefficient d'uniformité, $C_u = D_{60}/D_{10}$
D₁₀	Diamètre des grains correspondant à 10% de passant (mm)
D₃₀	Diamètre des grains correspondant à 30% de passant (mm)
D₆₀	Diamètre des grains correspondant à 60% de passant (mm)
D_r	Densité relative
E	Indice des vides
e_{max}	Indice des vides maximal
e_{min}	Indice des vides minimal
G_S	Masse spécifique / masse volumique des graines solides
R_C	Teneur en caoutchouc (%)
V_T	Volume total (mm ³)
V_{moule}	Volume du moule en mm ³
W_{sol}	Poids volumique du sol
γ_s	Poids volumique des grains solide (g/cm ³)
γ_d	poids volumique sèche (g/cm ³)
Δh	Déplacement horizontal (mm)
Δv	Déplacement vertical (mm)
σ_N	Contrainte normale (kPa)
τ	Contrainte de cisaillement tangentielle (kPa)
τ_{max}	Contrainte de cisaillement tangentielle maximale (kPa)
φ	Angle de frottement

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La stabilité des sols granulaires représente une question fondamentale en génie civil, notamment en géotechnique, en raison de son influence directe sur la capacité portante et la durabilité des structures. Pour comprendre et prédire le comportement de ces matériaux sous différentes sollicitations mécaniques et conditions environnementales, il est essentiel de procéder à une analyse rigoureuse de leurs propriétés physiques et mécaniques. Dans cette optique, les approches expérimentales et numériques constituent des outils indispensables pour évaluer des paramètres clés tels que la résistance au cisaillement, la déformation et la perméabilité des sols.

Récemment, l'incorporation de granulés de caoutchouc recyclés comme matériau de renforcement a suscité un intérêt croissant, du fait de leur capacité à améliorer les performances mécaniques des sols granulaires, notamment en renforçant leur résistance au cisaillement et leur capacité de charge. Malgré ces avancées prometteuses, l'application de ces granulés dans le domaine géotechnique demeure encore limitée, en raison d'un manque d'études approfondies sur leur comportement. En particulier, l'influence du diamètre moyen des particules de sable ainsi que la morphologie, la proportion et la répartition des granulés de caoutchouc dans les mélanges sable-caoutchouc sont des aspects peu étudiés, mais essentiels pour mieux comprendre leur effet sur la réponse mécanique des sols.

Dans ce contexte, la présente étude vise à évaluer l'influence du diamètre moyen du sable sur la résistance au cisaillement des mélanges sable-granules de caoutchouc, à l'aide d'essais de cisaillement direct réalisés avec la boîte de Casagrande. Trois diamètres moyens distincts ($D_{50} = 1 \text{ mm}$, 2 mm et $3,15 \text{ mm}$) ont été étudiés, chacun étant mélangé avec différentes proportions de granulés de caoutchouc (0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % et 10 %). Tous les mélanges ont été reconstitués à une densité relative élevée ($D_r = 90 \%$) et soumis à trois niveaux de contrainte normale : 100 kPa, 200 kPa et 400 kPa.

1. Comment la granulométrie du sable, notamment le diamètre moyen des particules (D_{50}), influence-t-elle le comportement mécanique (résistance au cisaillement, dilatance, angle de frottement interne) des mélanges sable-caoutchouc ?
2. Quelle est l'influence de la teneur en granulés de caoutchouc recyclés (R_c) sur la résistance mécanique des sols granulaires, notamment en conditions de densité élevée

et sous différentes contraintes normales ?

3. Dans quelle mesure les effets du diamètre moyen des particules de sable sont-ils amplifiés ou atténués selon le niveau de contrainte normale appliqué ($\sigma_n = 100, 200, 400$ kPa) ?

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

- Le **premier chapitre** présente une revue de la littérature portant sur l'effet de la taille des particules et de la teneur en granules de caoutchouc sur le comportement mécanique des sols, ainsi que l'influence de divers paramètres sur la réponse des matériaux granulaires.
- Le **deuxième chapitre** décrit en détail le dispositif expérimental utilisé, la méthodologie des essais de cisaillement, ainsi que la caractérisation physique des matériaux étudiés
- Le **troisième chapitre** analyse l'impact du diamètre moyen sur la résistance au cisaillement des mélanges sable-granule de caoutchouc
- Enfin, le **quatrième chapitre** examine de manière approfondie l'effet de l'incorporation de la teneur en granules de caoutchouc sur la réponse mécanique des sols granulaires.

CHAPITRE 1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1-Introduction

La réponse mécanique des sols joue un rôle essentiel dans de nombreux domaines de l'ingénierie. La mécanique des sols étudie ces réactions en analysant les caractéristiques, la composition et les interactions du sol avec les structures et fondations dans diverses conditions. Maîtriser ce comportement est crucial pour concevoir des fondations stables, assurer la sécurité des infrastructures et mener des projets de construction efficacement. Les sols argileux et granulaires présentent des comportements distincts, et des avancées en chimie des colloïdes et en minéralogie enrichissent leur étude. Des essais en laboratoire et sur site sont utilisés pour analyser le sol et concevoir des ouvrages adaptés. Cependant, la variabilité des propriétés des sols reste un défi pratique, rendant difficile la généralisation de leur comportement d'un site à l'autre. L'objectif de ce chapitre est d'examiner de plus près les recherches antérieures et les résultats obtenus.

1.2 Généralités sur l'influence de la taille des grains et la teneur en granules de caoutchouc sur le comportement mécanique des sols

1.2.1 Taille des grains

Belkhatir et al. (2011) ont mené une série d'essais en laboratoire afin d'examiner l'influence des propriétés granulométriques, en particulier le diamètre moyen (D_{50}), sur la résistance cyclique d'un mélange reconstitué de sable et de limon. Ce mélange a été préparé avec une densité relative ($D_r=53\%$). Les résultats obtenus révèlent que la résistance cyclique est étroitement liée aux diamètres effectif (D_{10}) et moyen (D_{50}), conformément aux relations présentées dans la figure (1.1). Leurs observations montrent que l'augmentation des valeurs de D_{10} et D_{50} se traduit par une amélioration significative de la résistance cyclique du matériau. Par ailleurs, ils ont également noté une légère diminution du pourcentage de fines présents dans le mélange étudié, soulignant ainsi l'importance de la granulométrie dans le comportement mécanique des sols.

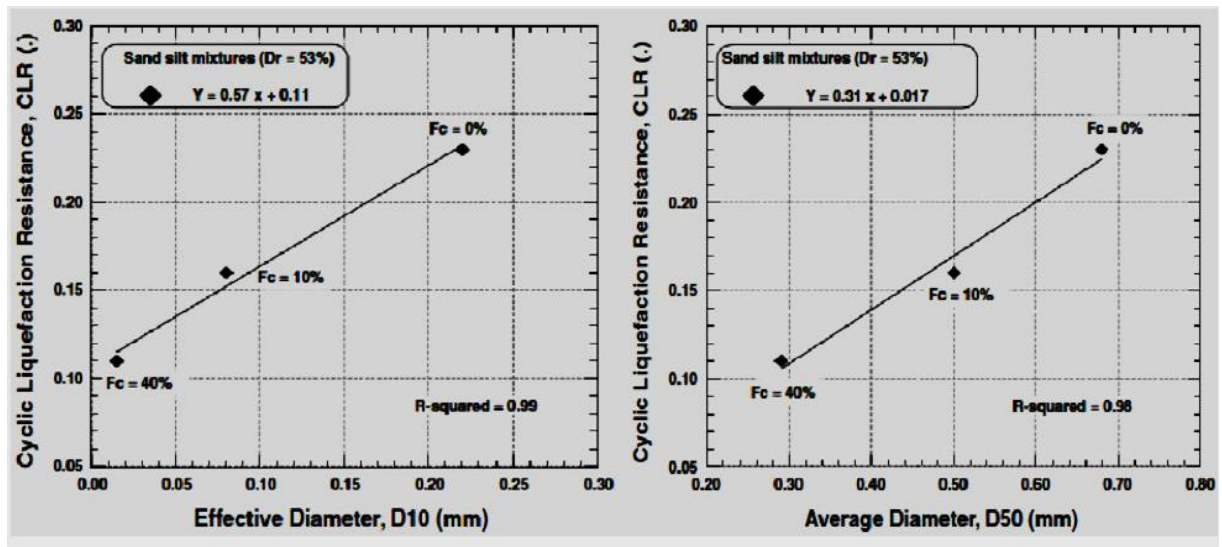


Figure 1.1 : Influence des diamètres (D_{10} , D_{50}) sur la résistance cyclique d'un sable limoneux Belkhatir et al. (2011)

L'étude de Liu et al. (2014) explore l'influence de la granulométrie, en particulier le coefficient d'uniformité (C_u), sur les propriétés mécaniques des sols granulaires, notamment leur résistance au cisaillement. Pour ce faire, ils ont réalisé une série d'essais triaxiaux. Les résultats montrent que le coefficient d'uniformité exerce un impact significatif sur la résistance au cisaillement des sols étudiés. Cependant, ils ont également observé que l'augmentation du coefficient d'uniformité n'affecte pas de manière notable la résistance au cisaillement non corrigée, comme le démontre la Figure 1.2. Cette recherche souligne ainsi l'importance de prendre en compte les caractéristiques granulométriques pour mieux comprendre le comportement mécanique des sols.

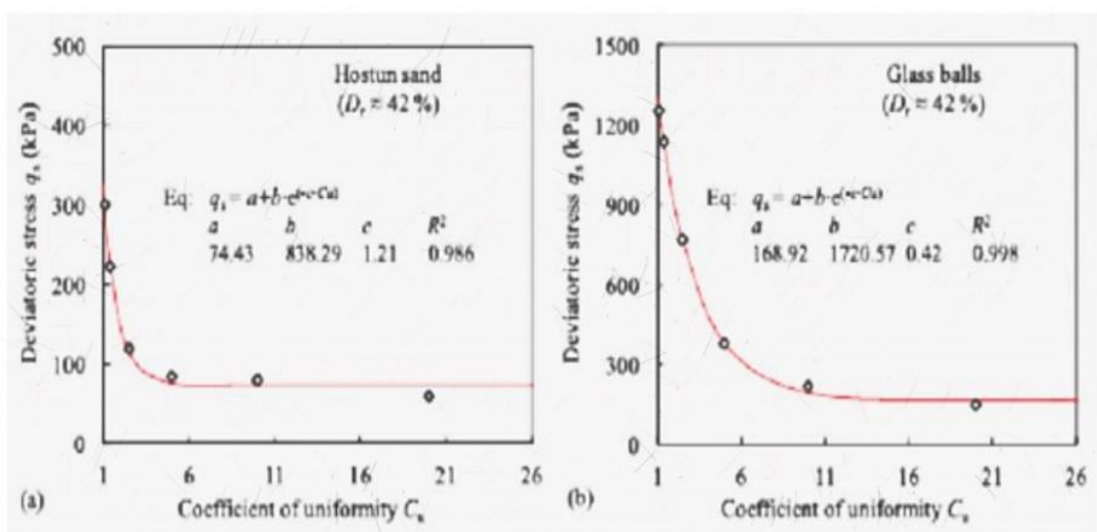


Figure 1.2: Influence du coefficient d'uniformité sur la résistance au cisaillement non drainée des matériaux granulaires, (a) sable d'Hostun (b) Billes de verre. Liu et al (2014)

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Megrousse et al. (2024) ont effectué une série de tests de cisaillement direct à la boîte de 99 essais pour le but d'examiner le comportement mécanique de sols sableux avec différents diamètres moyens des grains ($D_{50} = 2,00$ mm, 1,00 mm et 0,63 mm). Chaque échantillon contenait de 0 à 0,8 % de fibres de doum brutes et de 0 à 1 % de fibres de doum traitées, avec une gamme de 0,2 %. Les échantillons ont préparé avec densité relative élevée de ($D_r = 87$ %) et soumis à trois contraintes normales (100, 200 et 400 kPa). Les résultats expérimentaux mettent en évidence que l'augmentation de la taille moyenne des grains s'accompagne d'une élévation de l'angle de frottement interne, aussi bien pour les échantillons renforcés non traités que pour ceux ayant fait l'objet d'un traitement. De plus, La tendance observée concernant l'évolution de l'angle de frottement interne est attribuée à l'augmentation de la taille moyenne des grains, laquelle entraîne un grossissement significatif des particules. Ou, une granulométrie moyenne de $D_{50} = 2$ mm conduit à des échantillons constitués de particules plus grossières que ceux préparés avec une taille moyenne de 1 mm, cette différence devenant encore plus marquée en comparaison avec les échantillons reconstitués à partir d'un $D_{50} = 0,63$ mm comme illustre dans la figure 1.3.

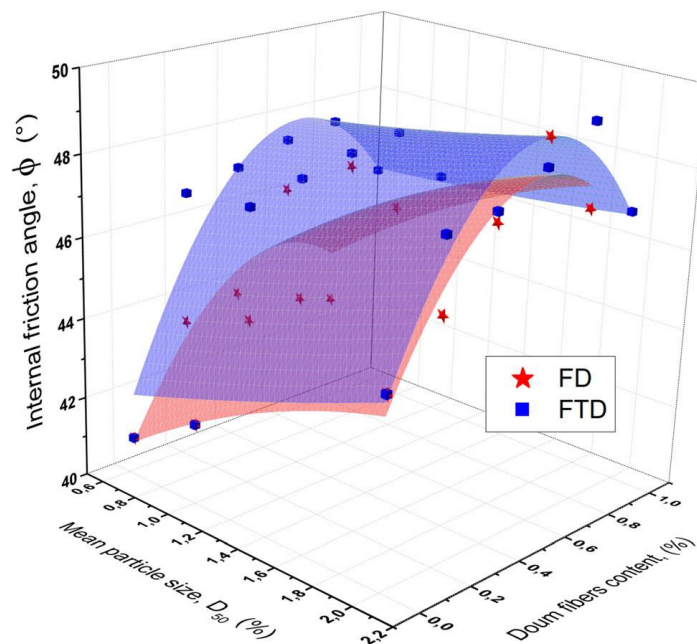


Figure 1.3 : Variation de l'angle de frottement interne selon la taille moyenne des grains et la proportion de fibres de doum, Megrousse et al. (2024).

Megrousse et al. (2025) ont mené une série d'expériences de cisaillement direct sur trois catégories de sable de rivière, chacune ayant une granulométrie moyenne différente ($D_{50} = 2,00$ mm, 1,00 mm et 0,63 mm). Ces sables ont été mélangés à des quantités variables de déchets de verre concassés ($CWG = 0, 10, 20$ et 30 %) et soumis à trois contraintes normales

différentes : 50, 200 et 400 kPa. Leurs résultats démontrent que lorsque (D_{50}) et les pourcentages de déchets de verre broyés augmentent, l'angle de frottement interne augmente également pour les sables purs et les mélanges. De plus, il convient de noter que pour $D_{50} = 2,00$ mm, une augmentation de la teneur en verre concassé jusqu'à 30 % entraîne un angle de frottement interne plus élevé (figure 1.4). Cela signifie que les combinaisons contenant des particules de sable plus grosses et une proportion plus élevée de verre concassé présentent des angles de frottement interne plus élevés que les mélanges contenant des particules de sable plus petites et une proportion plus faible de CWG.

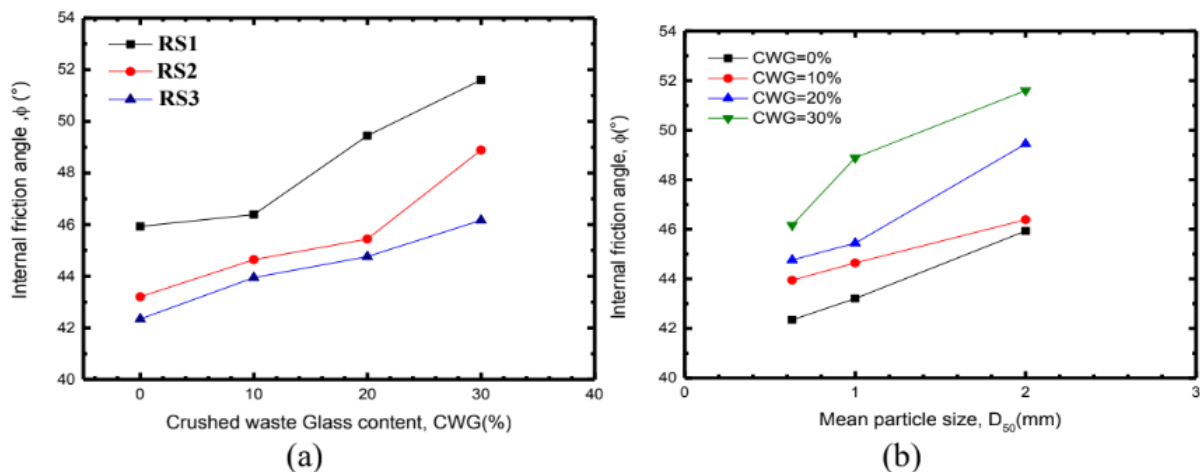


Figure 1.4: L'angle de frottement interne des matériaux testés varie :

a- angle de frottement interne par rapport à D_{50} , b- angle de frottement interne par rapport à la teneur en CWG

Megrouse et al. (2025)

1.2.2 Teneur en granules de caoutchouc

Anvari et al. (2017) ont mené une série d'essais pour analyser les effets de la densité relative et de la teneur en granules de caoutchouc sur les propriétés mécaniques des mélanges sable-caoutchouc, en mettant l'accent sur l'angle de frottement interne et de résistance de cisaillement. Les résultats montrent que l'ajout de teneur en granules de caoutchouc peut améliorer les propriétés mécaniques du mélange, mais uniquement à des teneurs spécifiques, notamment autour de 5 %. Cependant, au-delà de cette valeur, l'incorporation de caoutchouc granulé devient défavorable, entraînant une diminution de la résistance de cisaillement ainsi que de l'angle de frottement interne. Ces conclusions soulignent la nécessité de bien ajuster la teneur en caoutchouc granulé et la densité relative pour optimiser les performances mécaniques des mélanges sable-caoutchouc, comme illustré dans la figure 1.5.

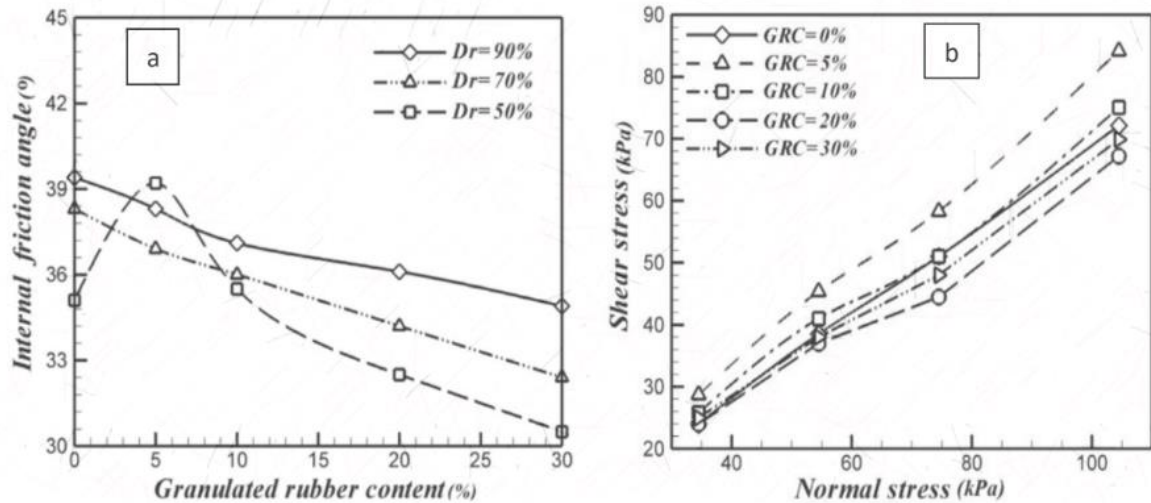


Figure 1.5: (a) Variations de l'angle de frottement interne avec la teneur en caoutchouc granulé à diverses densités relatives, et (b) enveloppes de contrainte de cisaillement pour des spécimens Avec différentes teneurs en caoutchouc granulé ($Dr = 50\%$). (Anvari et al. 2017).

Sung et al. (2022) ont analysé l'impact du caoutchouc granulé sur l'angle de frottement interne dans des mélanges sableux lâches et denses. Une teneur en caoutchouc de 7,5 % optimise l'angle de frottement, qui atteint $38,0^\circ$, soit une augmentation de 9,2 % par rapport au sable pure. Au-delà de ce pourcentage, l'angle diminue légèrement mais reste supérieur à celui du sable sans ajout de caoutchouc. Pour le sable pure, l'angle maximal observé est de $43,6^\circ$, mais il baisse progressivement avec l'augmentation du caoutchouc. À des teneurs élevées de caoutchouc, la réduction de l'angle atteint 12,8 %. Les performances accrues sont dues aux interactions particulières entre le sable et le caoutchouc, favorisées par sa texture et sa flexibilité. En conclusion, un mélange modéré de caoutchouc (environ 7,5 %) offre les meilleures performances (Figure 1.6).

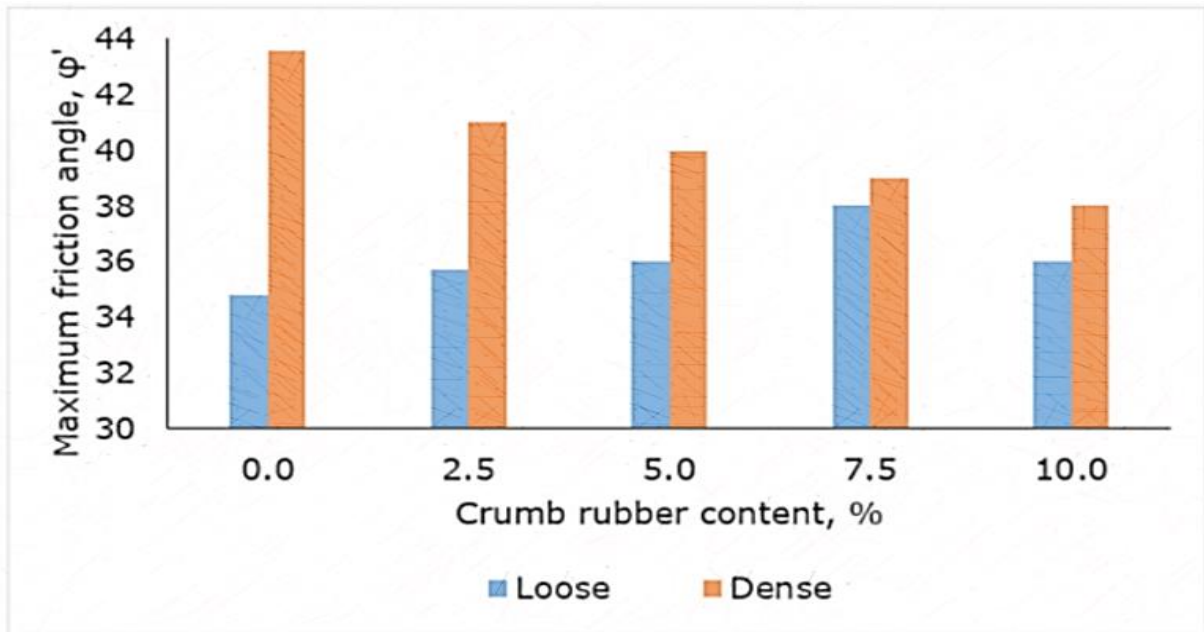


Figure 1.6: Angle de frottement maximum en fonction de la teneur en caoutchouc granulé. (Sung et al.2022)

Dah et Vadel Cheikh (2024) ont réalisé des essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande pour étudier l'effet des granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement d'un sable concassé anguleux. Les résultats, présentés dans les figures 1.8, 1.9 et 1.10, portent sur cinq mélanges avec des teneurs en caoutchouc (R_c) de 0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % et 10 %, préparés à une densité relative $D_r = 90$ %. Les échantillons ont été soumis à trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 400 kPa). L'étude montre que les granulés de caoutchouc influencent significativement la résistance au cisaillement et les propriétés mécaniques des mélanges. Une teneur optimale de 5 % en caoutchouc maximise à la fois la résistance au cisaillement et la dilatance. Cependant, au-delà de ce seuil, les performances mécaniques diminuent.

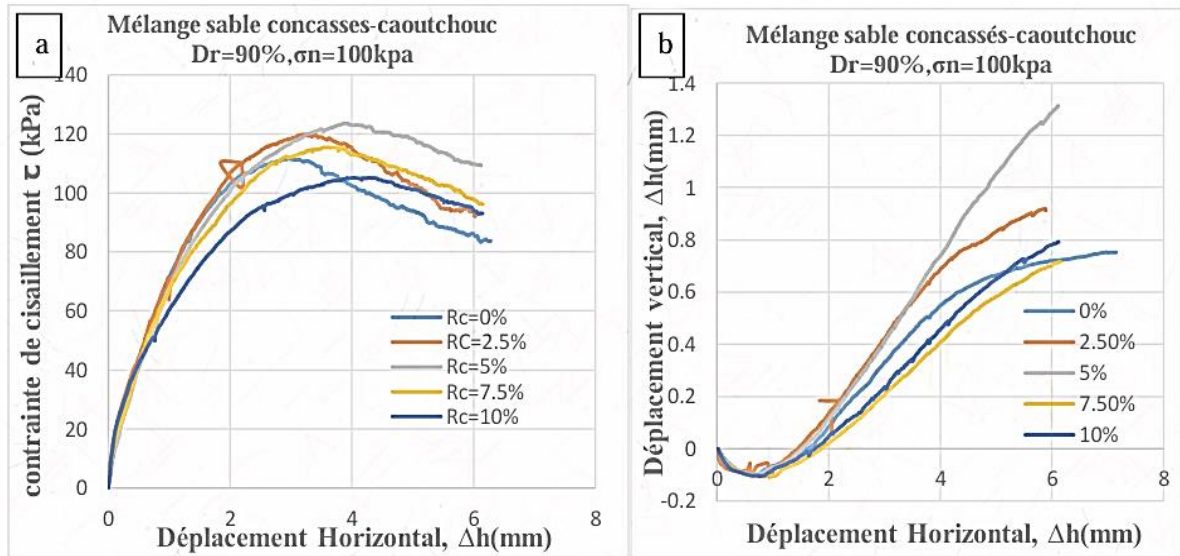


Figure 1.7: Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;($\sigma_n= 100$ kPa)
Dah et Vadel cheikh (2024)

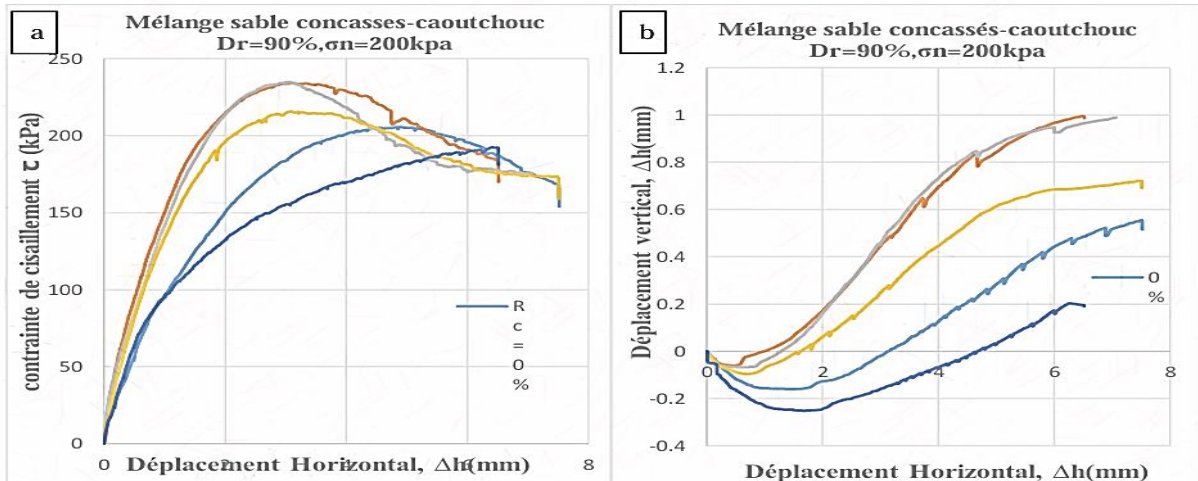


Figure 1.8: Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;($\sigma_n= 200$ kPa)
Dah et Vadel cheikh (2024)

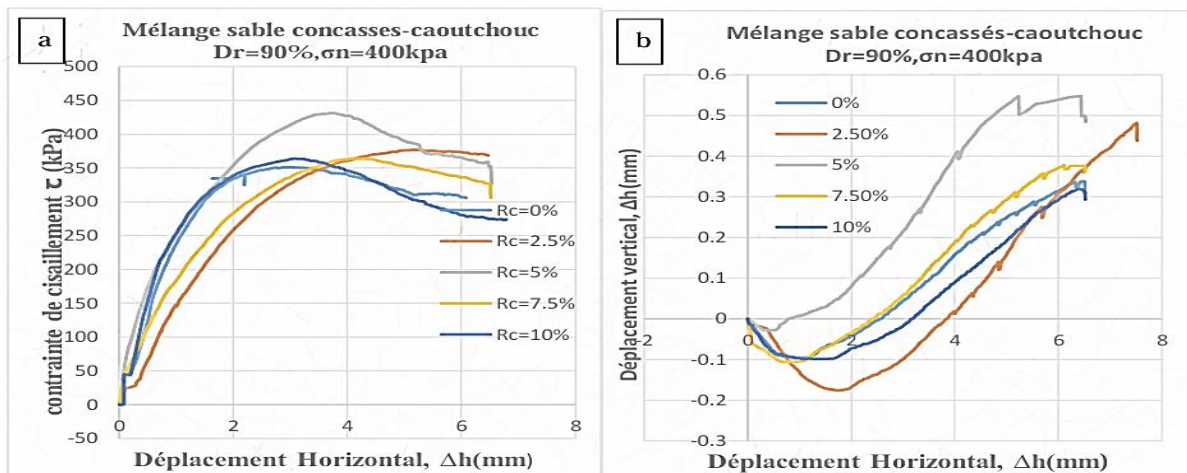


Figure 1.9: Comportement mécanique des mélanges sable concassés-granulés de caoutchouc ;($\sigma_n= 400$ kPa)
Dah et Vadel cheikh (2024)

1.3 Influence de quelques paramètres sur le comportement mécanique des sols

1.3.1 Densité relative

Arab et al. (2010) ont réalisé des essais en laboratoire sur deux types de sable, à savoir le sable de Chlef et le sable d'Hostun, afin d'étudier l'effet de la densité relative sur le comportement mécanique des sols granulaires. Les échantillons ont été préparés avec trois densités relatives distinctes ($Dr = 15\%$, $Dr = 50\%$ et $Dr = 65\%$) et soumis à une pression de confinement initiale de 100 kPa ($P_c = 100$ kPa). Les résultats ont révélé qu'une augmentation de la densité relative entraîne une amélioration de la résistance au cisaillement non drainée. De plus, Ils ont constaté que lorsque la densité relative augmente le nombre de cycles augmente également, quel que soit pour sable d'Hostun ou sable de Chlef, comme il est illustré dans la Figure 1.10.

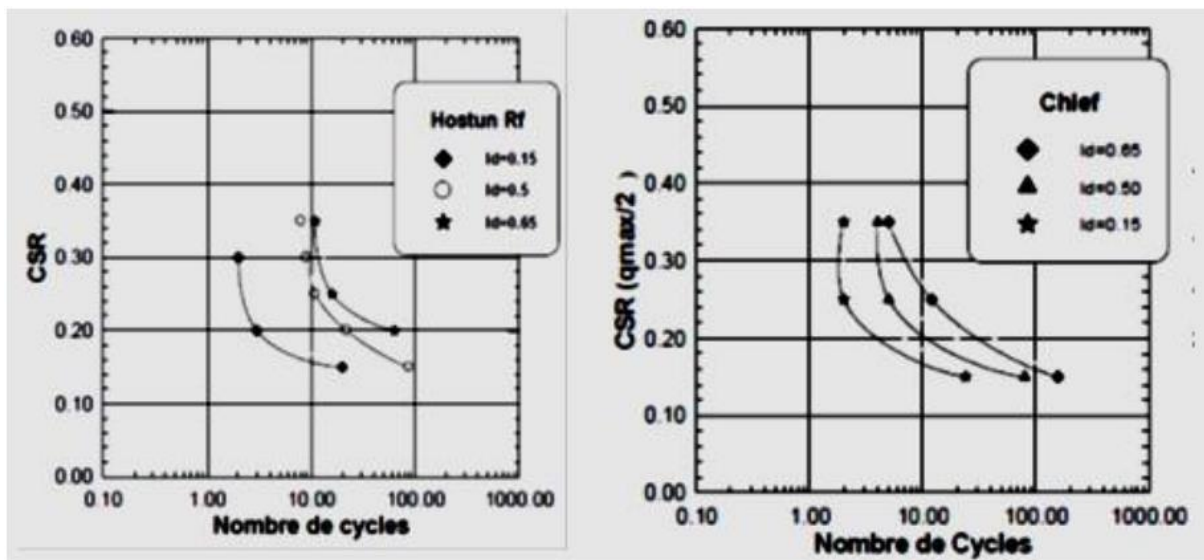


Figure 1.10: Influence de la densité relative sur le comportement mécanique des sables

(a)-Sable d'Hostun, (b)-Sable de Chlef Arab et al. (2010)

1.2.3 Effet de la forme des particules

Cherif Taïba et al. (2018) ont mené des essais en laboratoire non drainés sur trois types de sable présentant des formes de grains distinctes : le sable de Chlef (arrondi), le sable de Fontainebleau (semi-arrondi) et le sable de Houston (semi-anguleux). Ces sables ont été mélangés à des fines de faible plasticité, avec des proportions variant de 0 % à 40 % de fines (F_c), à une densité relative constante de 52 % et sous une contrainte de confinement de 100 kPa. Les résultats ont montré que la forme des grains a un impact significatif sur le comportement mécanique des mélanges de sable et de limon. Les propriétés géométriques des

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

grains, telles que leur sphéricité et leur angularité, influencent notablement la réponse non drainée des mélanges. Ils ont également observé que la résistance au cisaillement non drainée diminue lorsque la sphéricité des grains diminue et que l'angularité des grains augmente dans les mélanges de sable et de limon. Ces conclusions sont illustrées par la figure 1.11.

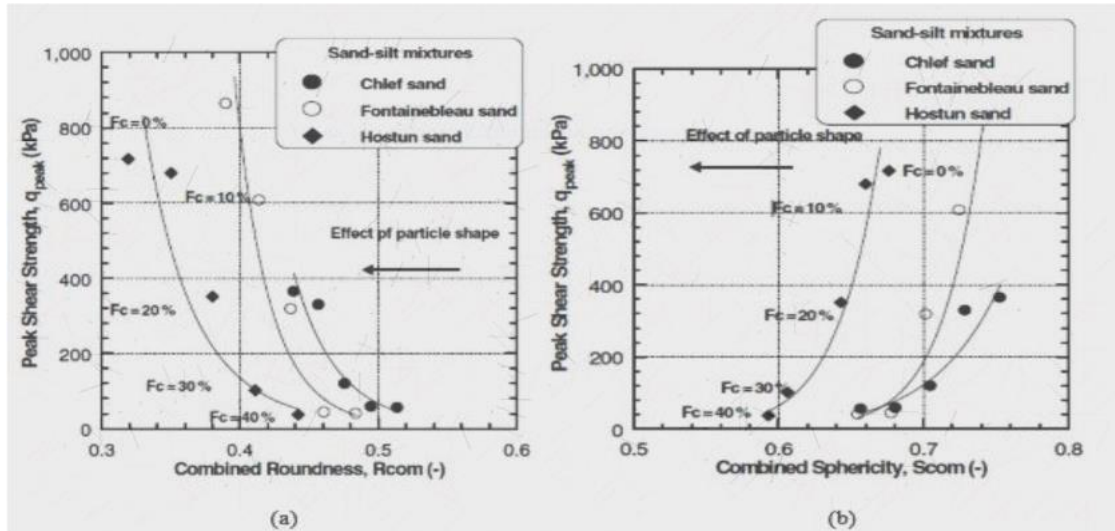


Figure 1.11 : Résistance au cisaillement non drainé au pic versus les caractéristiques de forme des grains Cherif Taïba et al (2018).

Xiao et al. (2019) ont étudié l'influence de la forme des particules, évaluée en termes de régularité générale sur le comportement mécanique des sols granulaires. Leurs travaux ont révélé que régularité des grains exerce un impact significatif sur la résistance au cisaillement non drainé des mélanges de sable avec fines non plastiques. À travers une série d'essais triaxiaux, ils ont observé que le déviateur maximal augmentait de 0,77 à 1,19 MPa lorsque la régularité globale diminuait de 0,971 à 0,4. Un autre résultat clé montre qu'une augmentation de la pression de confinement de 0,05 à 0,4 MPa entraîne une diminution de la régularité globale de 0,971 à 0,844, sous une même pression de confinement de 0,2 MPa. Cette variation se traduit par une augmentation de la déformation axiale au pic, qui passe de 2,46 % à 7,17 %. Ces observations sont illustrées dans la figure 1.12.

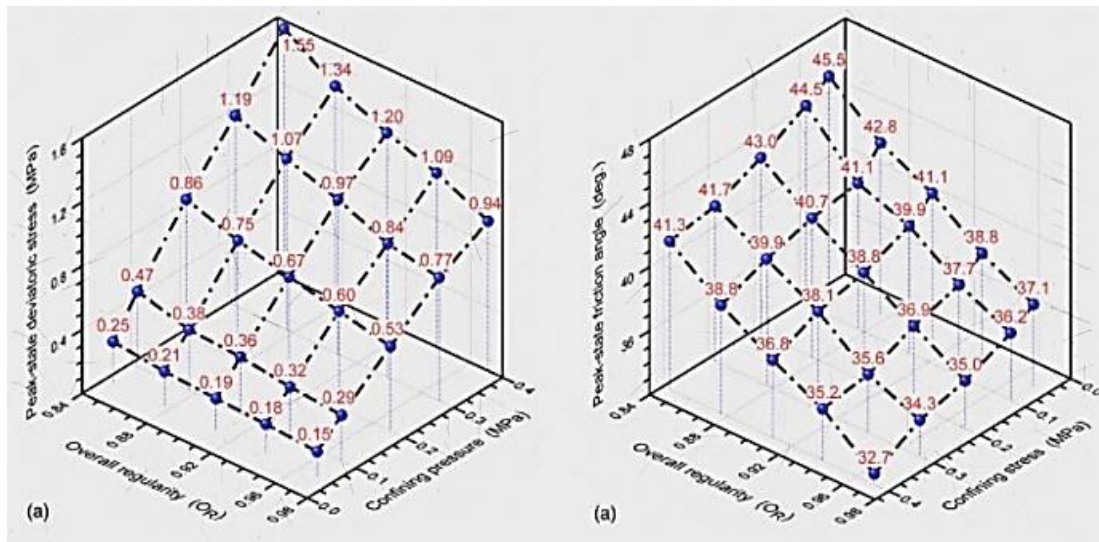
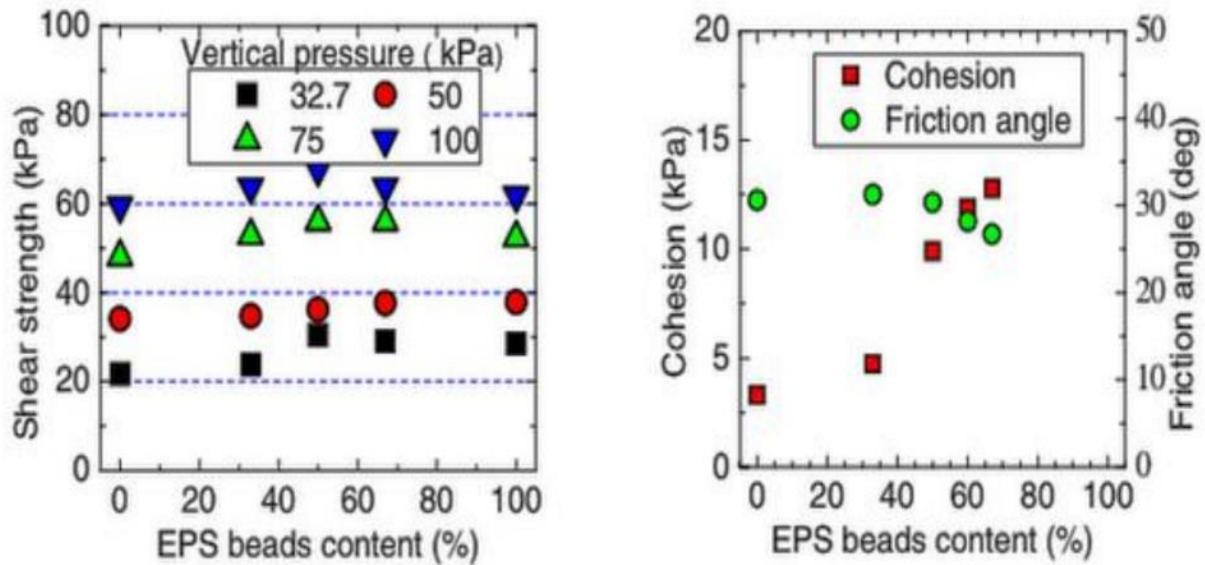


Figure 1.12 : Effet de régularité globale sur le comportement mécanique des mélanges. Xiao et al. (2019)

1.3.3 Contrainte initiale

Zhu et al. (2008) ont réalisé des essais de cisaillement sur un mélange constitué de sable et de billes de polystyrène expansé (EPS), dans le but d'analyser l'effet de la teneur en EPS sur les paramètres de résistance au cisaillement d'un sable à caractère argileux, notamment la cohésion (C) et l'angle de frottement interne (ϕ). Les échantillons, humidifiés à 13%, contenaient différentes proportions des billes EPS (0.33, 50, 60, 67 et 100%) et ont été soumis à des contraintes verticales de 32.7, 50, 75 et 100 kPa.

Les résultats ont révélé que l'augmentation de la teneur en EPS améliore la résistance au cisaillement du mélange jusqu'à une proportion optimale de 67%. Au-delà de cette valeur, une diminution de la résistance est observée avec l'ajoute supplémentaire d'EPS. Par ailleurs, l'introduction des billes de polystyrène expansé modifie sensiblement les propriétés mécaniques du matériau : la cohésion augmente interne diminue, comme illustre dans la figure 1.13.



Preload pressure, $PP = 100$ kPa, Gravimetric Water content = 13%

Figure 1.13 : Effet de la teneur en billes EPS sur la résistance au cisaillement. Zhu et al. (2008).

Mokhtari et Medjahdi (2021) ont mené une série d'essais de cisaillement direct en laboratoire pour étudier le comportement mécanique du sable de Chlef, caractérisé par un diamètre minimal des grains de 0,08 mm. Ces essais ont été réalisés sous différentes contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 300 kPa) et avec des pourcentages variables de bentonite ajoutée ($FB = 0 \%, 10 \%, 20 \%$ et 30%). Les échantillons ont été préparés en utilisant une technique de dépôt à sec afin de garantir une reconstitution contrôlée, puis soumis à des conditions simulées de contraintes naturelles initiales. Les résultats obtenus, illustrés dans la figure 1.14, révèlent que la contrainte normale initiale joue un rôle crucial dans la résistance au cisaillement des mélanges de sable et de bentonite. Plus précisément, une augmentation de la contrainte normale initiale entraîne une modification notable des propriétés mécaniques des mélanges. En outre, les analyses montrent que le sable propre de Chlef présente une résistance au cisaillement significativement plus élevée par rapport aux mélanges contenant de la bentonite.

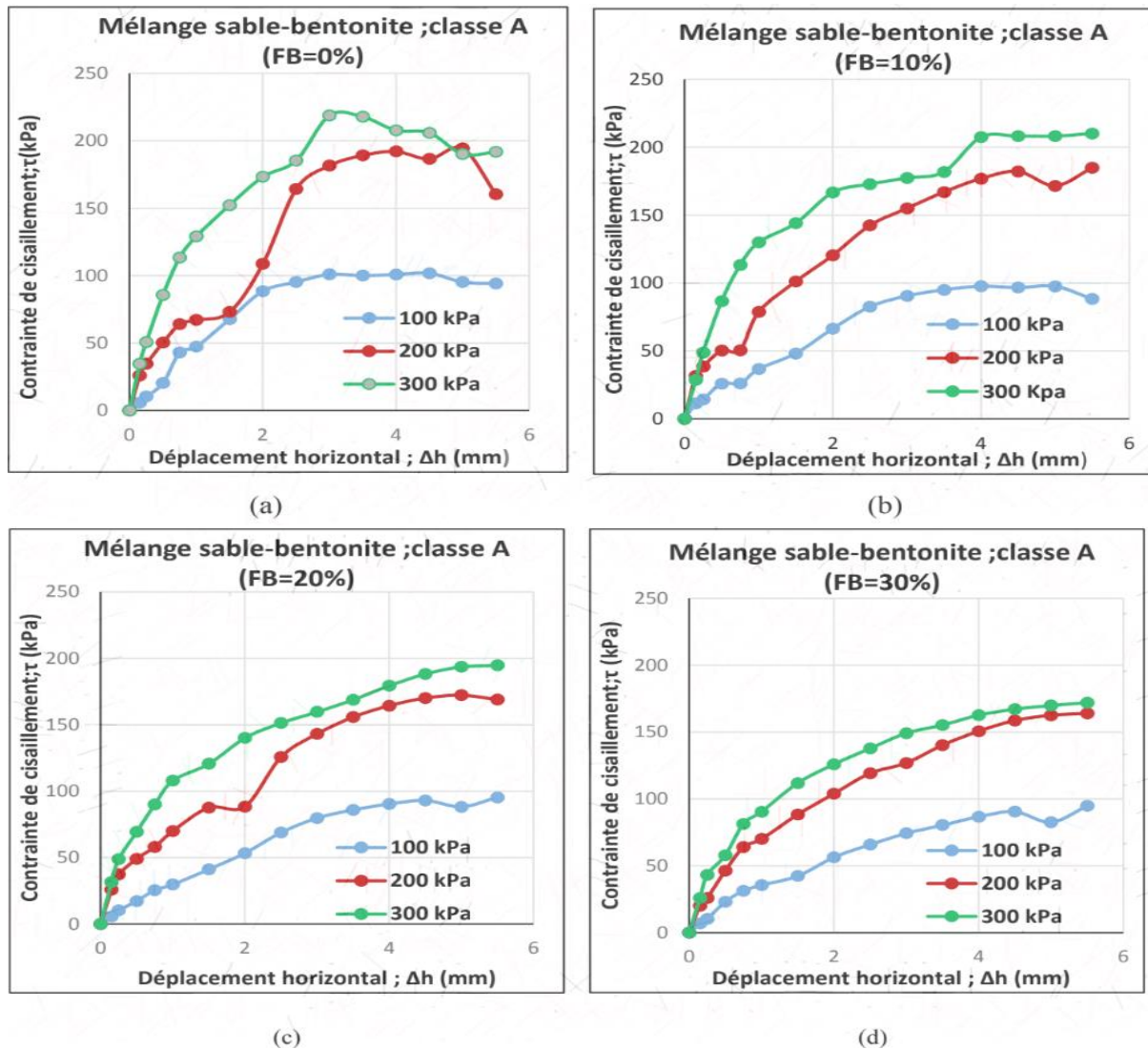


Figure 1.14: Effet de la contrainte normale sur le comportement mécanique des mélanges sable-bentonite ($D_{min} = 0.08$ mm) (a)- FB=0 % (b)-FB=10 % (c)- FB=20 % (d)-FB=30 % « Mokhtari et Medjahdi (2021) »

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons une recherche approfondie de plusieurs études qui se concentrent sur l'évaluation des effets de divers paramètres, tels que la taille des particules, les proportions de caoutchouc granulé ajoutées, la forme des particules, la densité relative, ainsi que les contraintes initiales appliquées, dans le but d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols. Ces recherches mettent en lumière l'importance de ces facteurs dans la modification du comportement géotechnique des sols, notamment pour les sols moins résistants ou nécessitant une amélioration. À partir de l'analyse des études précédentes, il ressort que la taille des particules joue un rôle fondamental dans les performances mécaniques des sols. De plus, l'introduction de caoutchouc granulé peut considérablement améliorer les propriétés géotechniques des sols, à condition que les proportions de caoutchouc ajoutées

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

soient optimisées. En effet, un pourcentage excessif ou insuffisant de caoutchouc peut avoir des effets néfastes sur la résistance et la stabilité du matériau. Les études montrent également que des paramètres comme la densité relative et la distribution granulométrique influencent directement les interactions entre les grains, modifiant ainsi la cohésion et l'angle de frottement interne des mélanges.

Le chapitre suivant sera consacré à une description détaillée de l'appareillage expérimental utilisé dans cette recherche, ainsi que des méthodologies adoptées pour mener les essais. Nous examinerons également les propriétés physiques spécifiques des matériaux étudiés, afin de mieux comprendre leur comportement sous différentes conditions de chargement et de contrainte. Cette étape est cruciale pour garantir la fiabilité et la pertinence des résultats obtenus dans le cadre de cette étude.

CHAPITRE 2
DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET
PROCEDURE DE L'ESSAI

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons en détail le dispositif expérimental que nous avons utilisé dans notre étude, ainsi que les procédures d'essai utilisant l'appareil de cisaillement Casagrande. Nous détaillerons également les caractéristiques physiques du matériau testé, constitué d'un sable de chlef ayant trois diamètres moyens ($D_{50}=1, 2$ et 3.15 mm) mélangé avec des différents pourcentages de caoutchouc ($R_c=0, 2.5, 5, 7.5$ et 10%). Enfin, nous décrirons les méthodes employées pour la reconstitution et la préparation des échantillons en vue de réaliser différents essais de cisaillement direct.

2.2. Dispositif expérimental

2.2.1. Introduction

Différents types d'essais en laboratoire peuvent être effectués pour étudier le comportement mécanique des sols granulaires. Ces essais sont réalisés sur des mélanges de sable comprenant divers pourcentages de caoutchouc, en utilisant des instruments et des équipements spécialisés tels qu'un appareil de cisaillement à la boîte direct "boîte de Casagrande", comme illustré dans la figure 2.1.



Figure 2.1 : Appareil de cisaillement utilisé dans cette étude.

2.2.2 But de l'essai

L'objectif principal de cet essai est d'évaluer les propriétés mécaniques du sol en effectuant des essais de cisaillement direct à l'aide d'une boîte de Casagrande, qui permet de soumettre l'échantillon à une charge constante tout en subissant un cisaillement rectiligne.

CHAPITRE 2 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL PROCEDEUR DE L'ESSAI

Cet essai a été utilisé pour l'objet d'étudier l'influence de diamètre moyenne et de teneur en caoutchouc sur les caractéristiques mécaniques du sable de chlef. 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 Eléments constituant la boîte de cisaillement

Le dispositif de cisaillement comprend les éléments de base suivants :

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

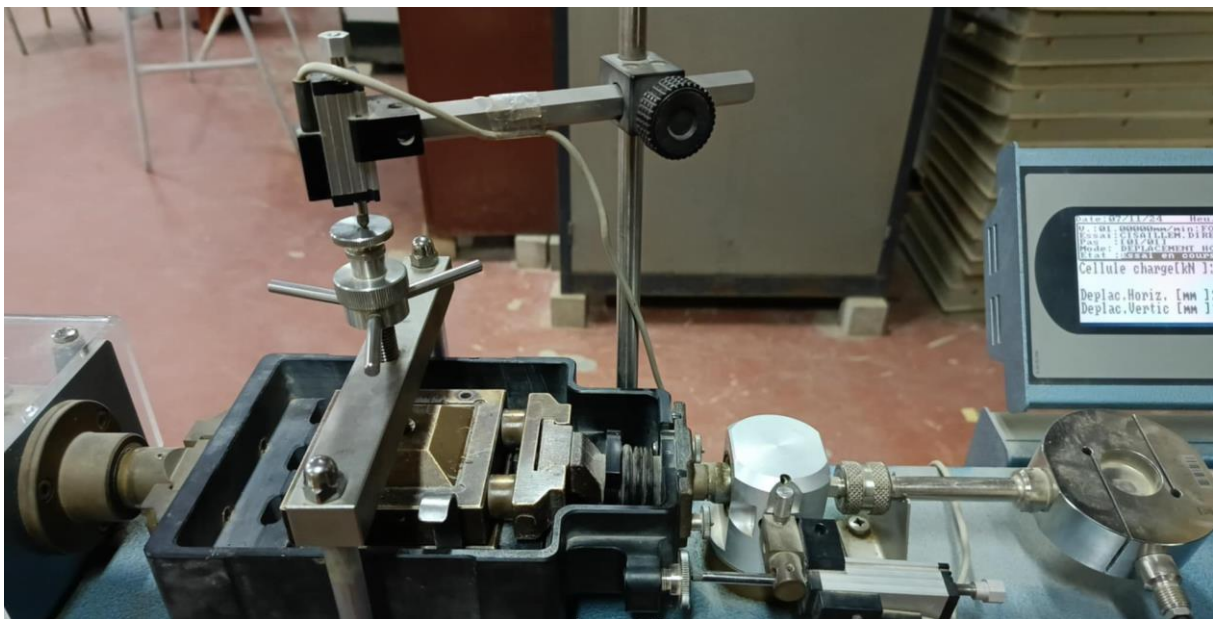


Figure 2.2: Composants de la boîte de cisaillement direct.



Figure 2.3: Accessoires de la boîte de cisaillement

2.2.4. Principe de l'essai de cisaillement

Pour évaluer les propriétés mécaniques des sols, l'essai de cisaillement en boîte Casagrande est couramment utilisé. Cette méthode implique de placer un échantillon de sol cubique (6 cm x 6 cm x 2,5 cm) entre deux demi-boîtes, la boîte inférieure fixée et la boîte supérieure mobile. Une contrainte verticale N et une force tangentielle T sont appliquées à l'échantillon selon la symétrie de la boîte comme l'indique la (Figure 2.4). La contrainte normale est généralement fixée à des valeurs prédéfinies ($\sigma_n = 100 \text{ kPa}$, 200 kPa et 400 kPa), tandis que la contrainte tangentielle est calculée selon une procédure spécifique :

- a. Calculer la surface initiale de la boîte qui est égale ($6 * 6 = 36 \text{ cm}^2$).
- b. Calculer la surface corrigée : $(L - \Delta L) * L$. $\Delta L = \Delta L_{pic} = \text{vitesse de déformation} * \text{temps} = \text{Déformation} * t$.
- c. La vitesse de déformation appliquée est fixe durant tout l'essai ;
Les sols pulvérulents : **1mm/ min** ;
- d. T = lecture de comparateur et on convertit dans un tableau qui correspond d'après la fiche technique de l'appareil de cisaillement.
- e. La contrainte de cisaillement τ est égale au rapport de l'effort tranchant T appliqué à la boîte à celui de la surface corrigée « **A corrigée** » $\tau = T / A_{corrigée}$.

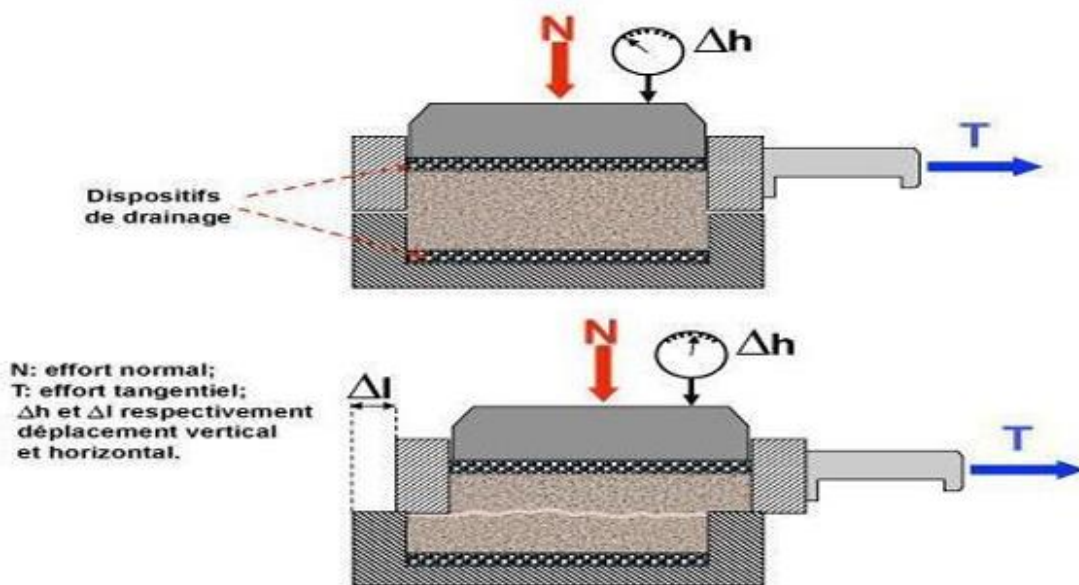
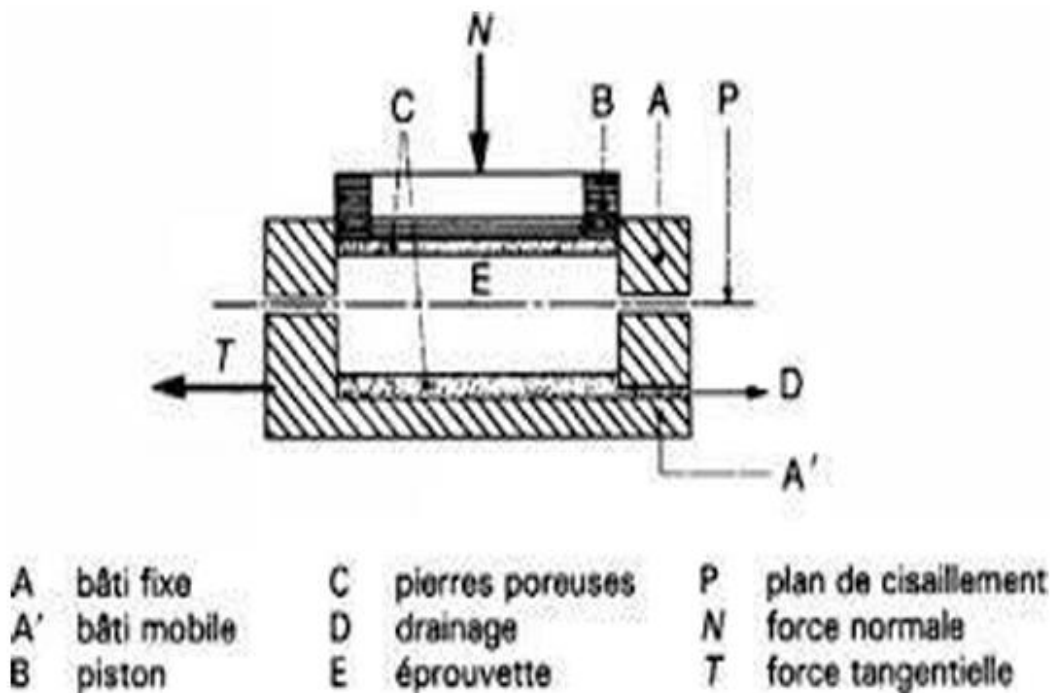


Figure 2.4 : Plan de la contrainte normale (σ) et de la contrainte tangentielle (τ).

2.2.5 Détermination des caractéristiques intrinsèques de sols

En réalisant plusieurs essais de cisaillement à différentes contraintes normales et tangentielles, il est possible de déterminer la courbe intrinsèque de l'échantillon de sol et de tracer la courbe Coulomb ou Mohr-Coulomb. Cette courbe permet de définir les valeurs de cohésion c et d'angle de frottement ϕ , comme illustré dans la figure 2.5. La répétabilité des essais de cisaillement est cruciale pour obtenir des résultats fiables.

La droite est définie par l'équation : $\tau = \sigma \tan \phi + C$

- ϕ est appelé l'angle de frottement, il représente la pente de la droite est exprimée en degré.

- C est appelée la cohésion.

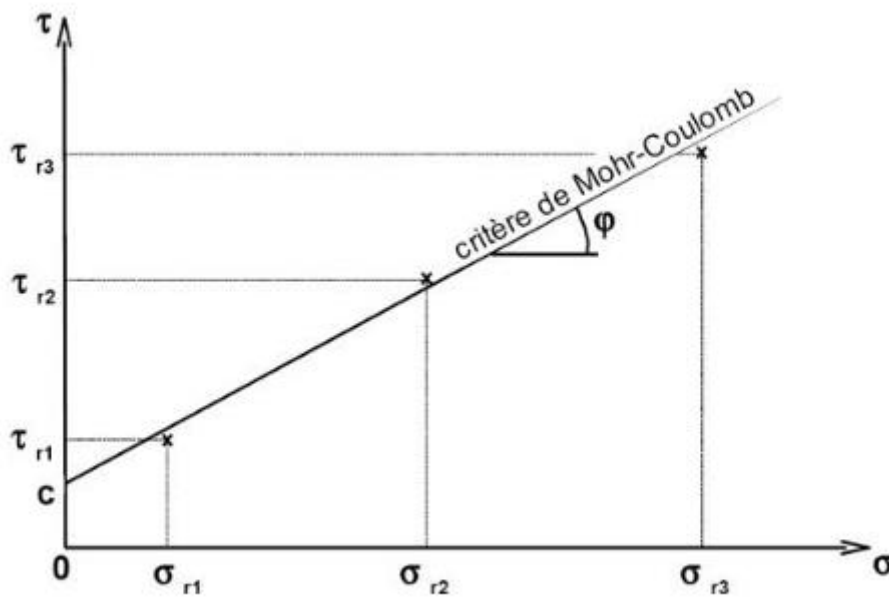


Figure 2.5 : Courbe intrinsèque des sols.

2.3. Matériaux testés

Les essais en boîte de cisaillement direct ont été effectués sur trois classes granulaires de sable différentes, caractérisés par leur diamètre moyen ($D_{50} = 3,15$ mm, 2 mm et 1 mm), Ces classes granulaires ont été mélangés avec du caoutchouc (0%, 2.5%, 5%, 7.5% et 10%), dont la taille maximale était de $D_{\max} = 4$ mm. Les matériaux utilisés dans cette étude expérimentale sont illustrés à la Figure (2-6). Les caractéristiques physiques des matériaux étudiés sont présentées dans le tableau (2-1). Les courbes granulométriques des échantillons examinés sont montrées sur la Figure (2.7). Les variations des indices de vides en fonction de la teneur en caoutchouc sont illustrées sur la figure (2.8). A partir de cette figure, nous voyons que l'indice de vide augmente en rapport de pourcentage de granulés de caoutchouc augmente.

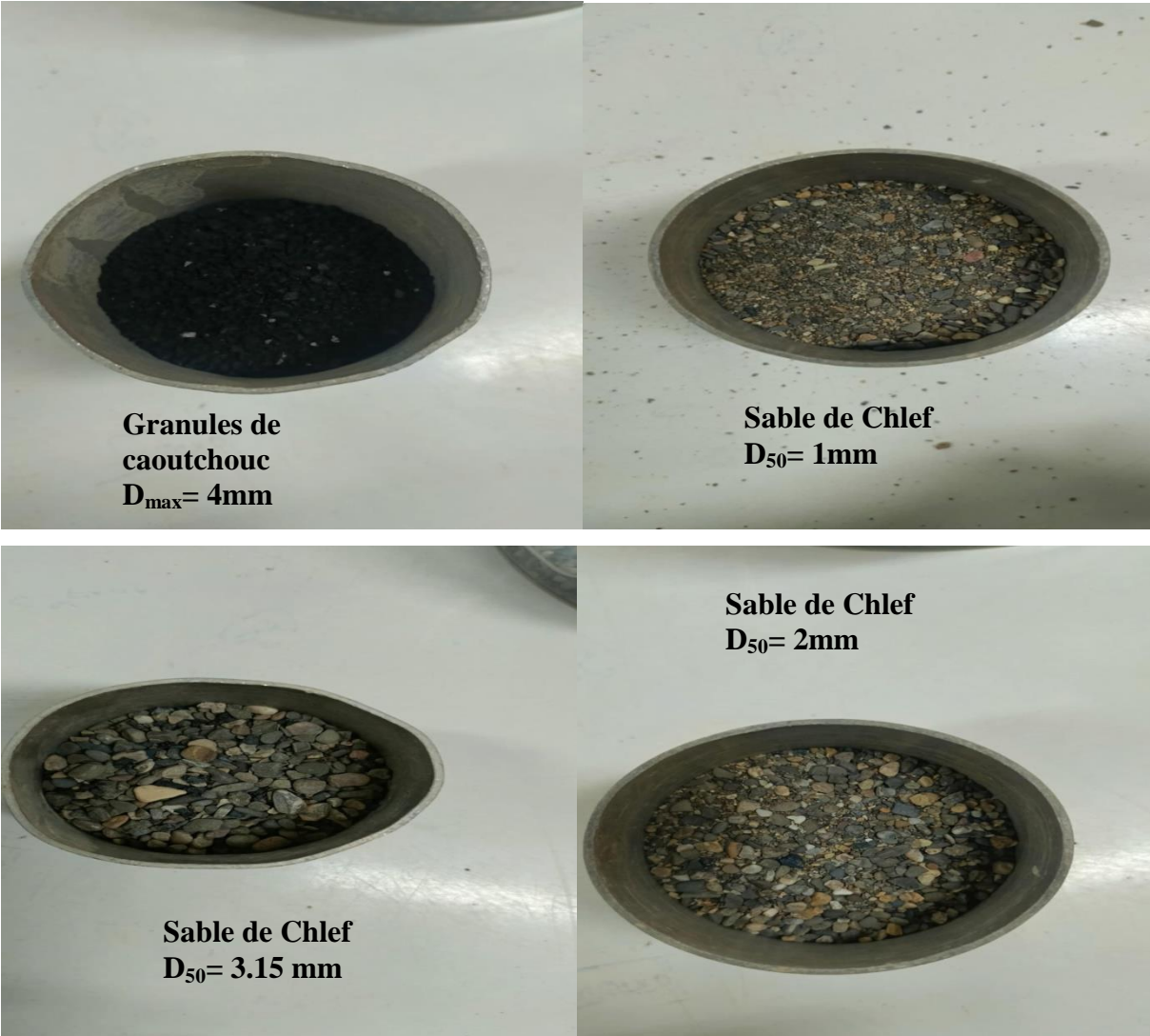
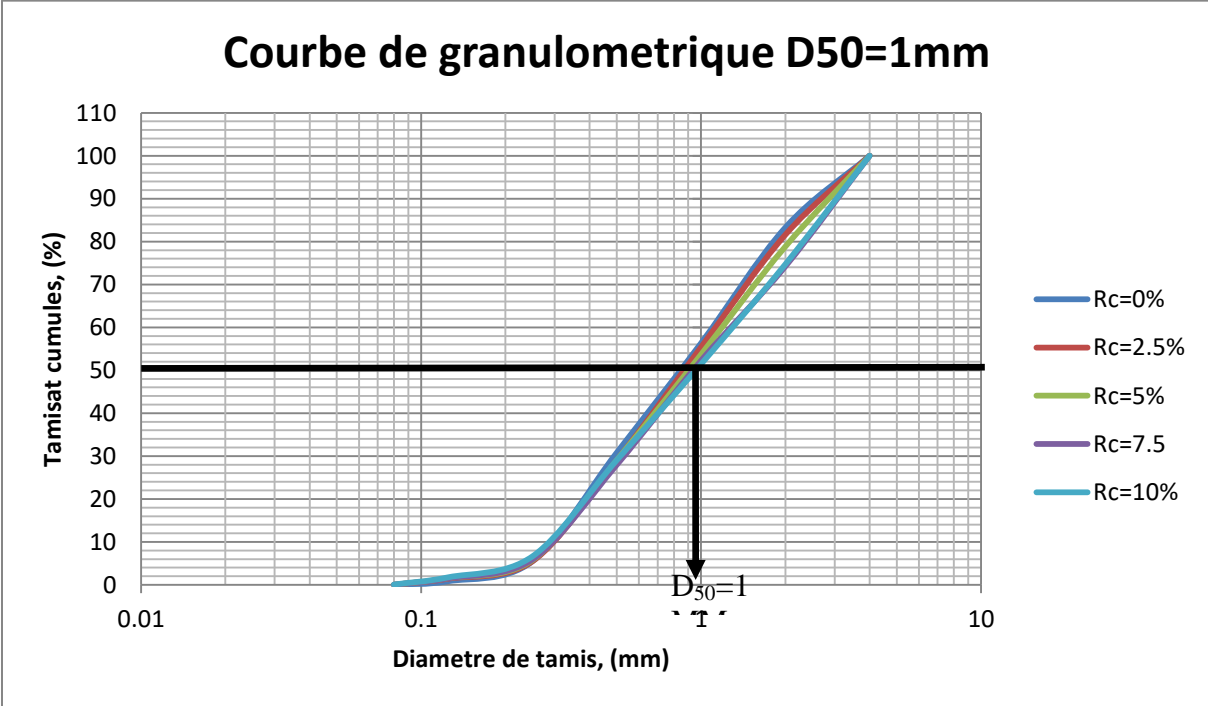


Figure 2.6 : Matériaux utilisés dans cette étude expérimentale.



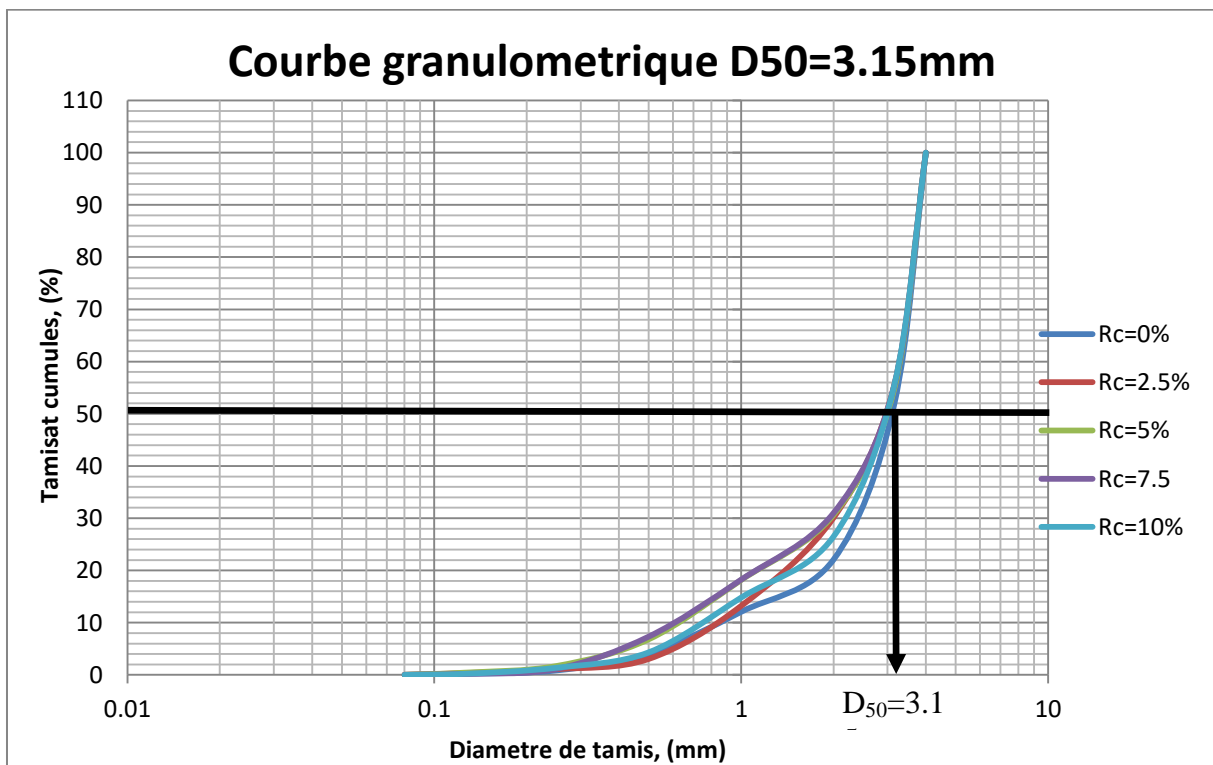
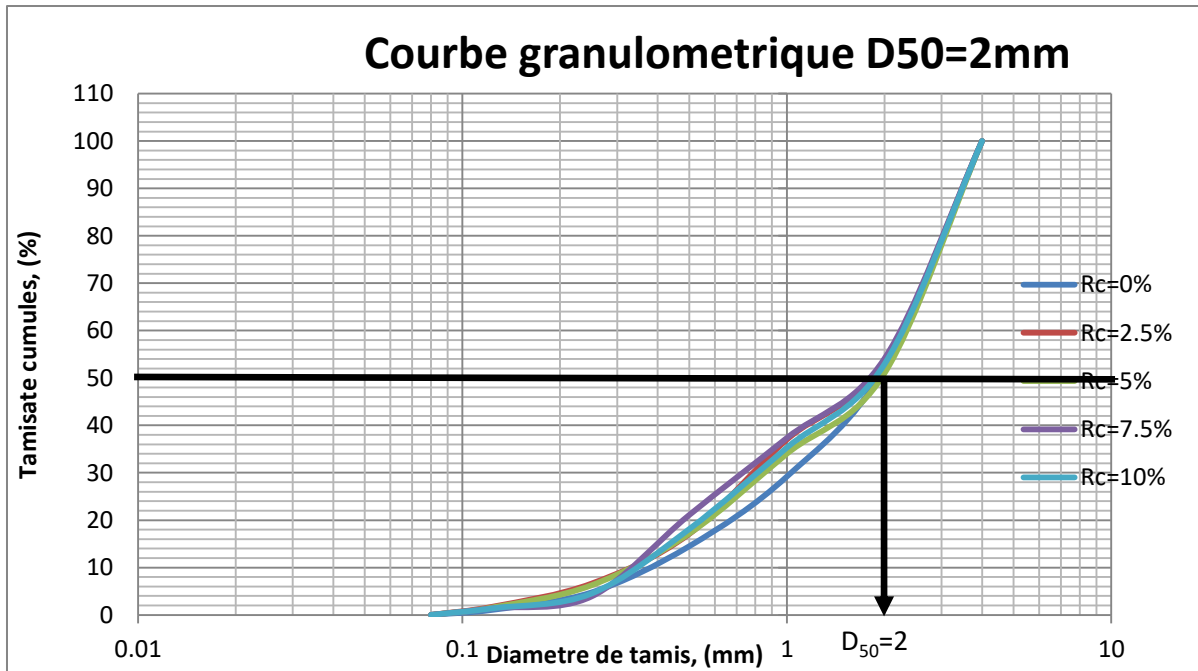
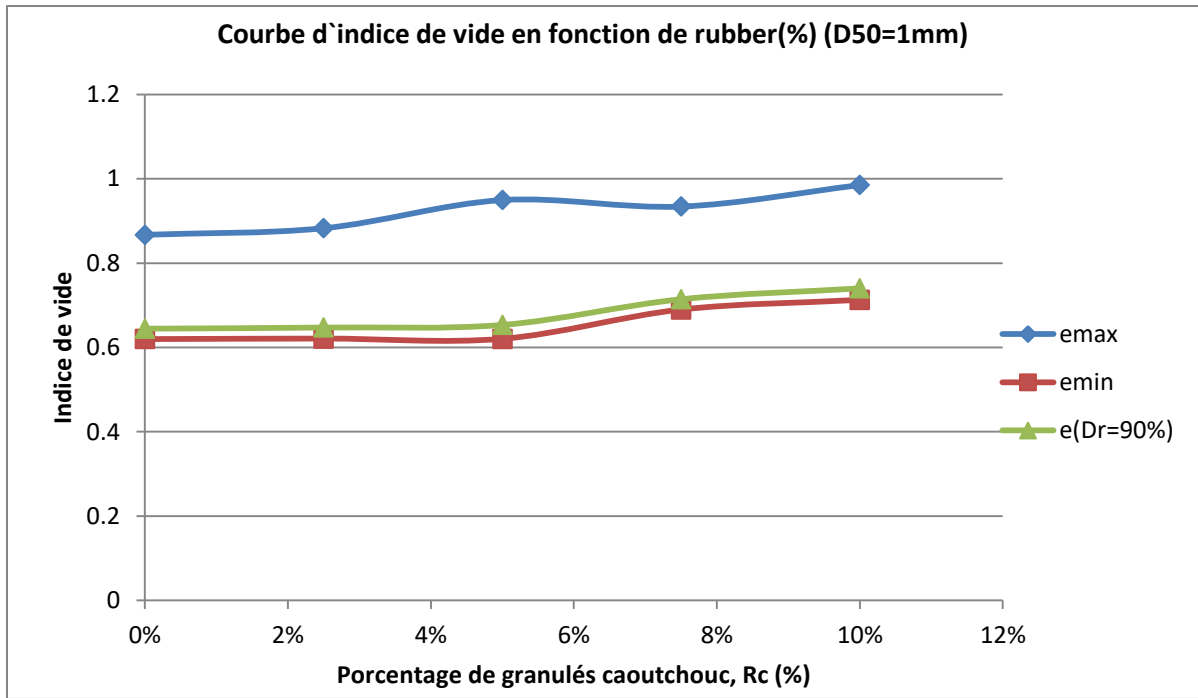
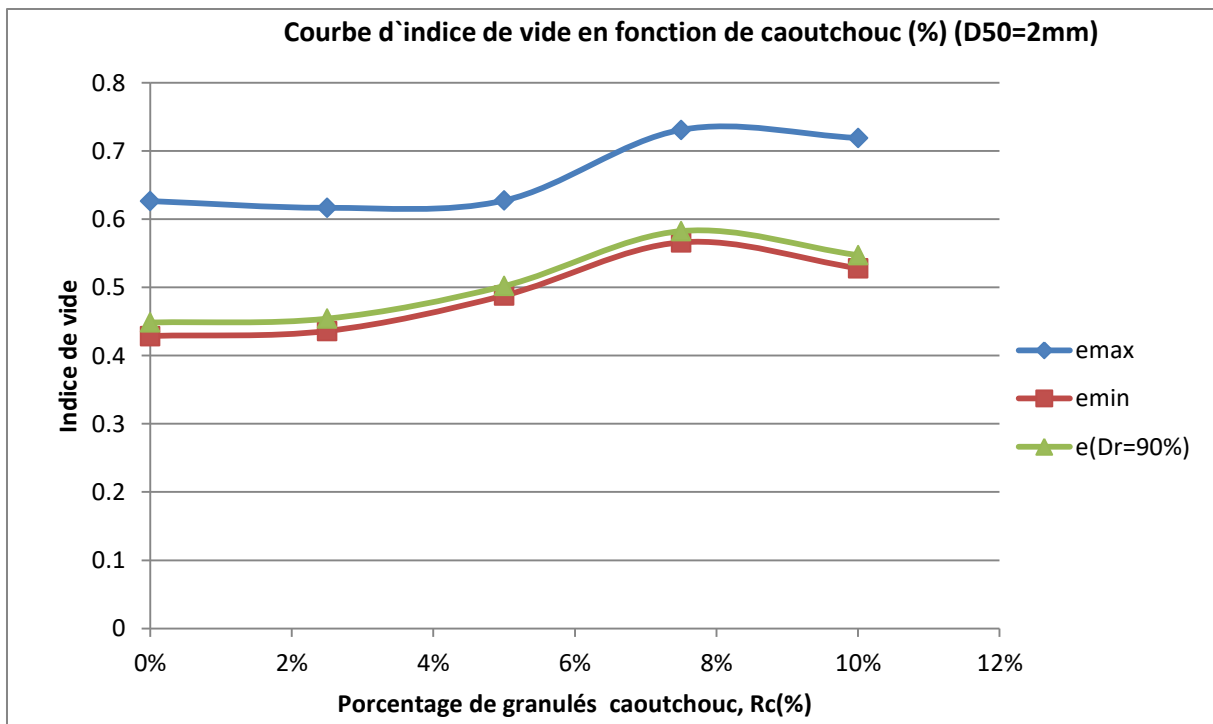


Figure 2.7: Courbes granulométriques des matériaux utilisés.

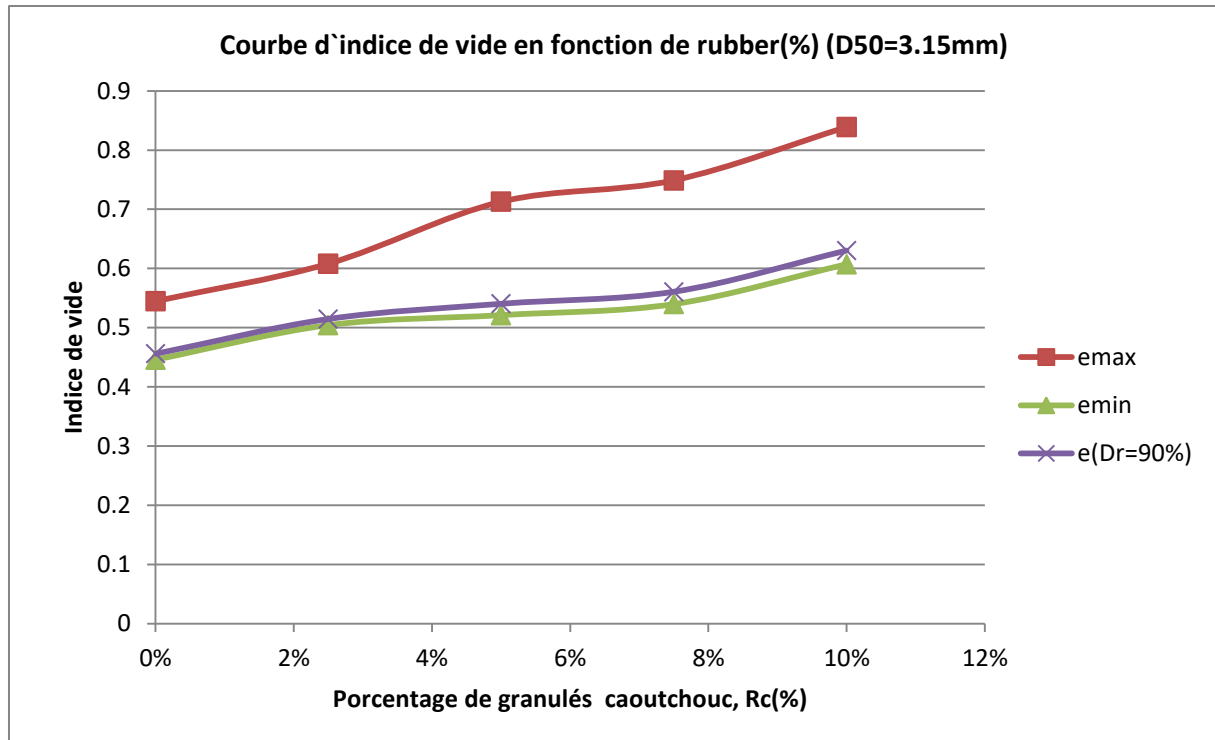


(a)



(b)

CHAPITRE 2 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL PROCEDEUR DE L'ESSAI



(c)

Figure (2.8) : Variations des indices de vides en fonction de la teneur en caoutchouc,

Tableau 2.1: Propriétés physiques de Sable Chlef sur trois classes granulaires de sable différentes.

Sable	Rc (%)	G _s	e	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	C _c	e _{max}	e _{min}
Sable de chlef D ₅₀ =1mm	0	2.65	0.740	0.28	0.54	1.40	5.25	0.74	0.985	0.712
	2.5	2.79	0.647	0.3	0.52	1.17	3.9	0.77	0.882	0.621
	5	2.75	0.653	0.3	0.53	1.3	4.33	0.72	0.949	0.620
	7.5	2.7	0.714	0.3	0.54	1.35	4.5	0.72	0.934	0.689
	10	2.84	0.644	0.3	0.5	1.15	3.83	0.72	0.867	0.619
Sable de chlef D ₅₀ =2mm	0	2.63	0.448	0.38	1.1	2.40	6.32	1.33	0.626	0.428
	2.5	2.59	0.454	0.33	0.75	2.30	6.97	0.74	0.616	0.436
	5	2.55	0.502	0.35	0.85	2.45	7	0.84	0.627	0.488
	7.5	2.51	0.582	0.34	0.74	2.35	6.91	0.69	0.731	0.566
	10	2.47	0.547	0.35	0.81	2.35	6.71	0.8	0.719	0.528

Sable de chlef D₅₀= 3.15 mm	0	2.65	0.455	0.85	2.5	3.3	3.88	2.22	0.544	0.445
	2.5	2.61	0.514	0.82	0.90	3.20	3.90	0.31	0.608	0.504
	5	2.57	0.540	0.6	0.95	3.20	5.33	0.47	0.712	0.521
	7.5	2.53	0.560	0.6	1	3.20	5.33	0.42	0.748	0.539
	10	2.49	0.630	0.75	1.15	3.20	4.27	0.55	0.838	0.607

2.4. Procédure de l'essai

2.4.1 Introduction

Afin de réaliser les essais de cisaillement, il est essentiel de préparer une quantité suffisante du mélange sable-granule de caoutchouc, permettant d'effectuer au minimum trois essais sous différentes charges.

Le choix de la boîte de cisaillement de type "Casagrande" dépend de la nature du sol à tester : les sols pulvérulents nécessitent une boîte à section carrée, tandis que les sols cohérents sont plus adéquatement testés dans une boîte circulaire. Il est impératif que la largeur ou le diamètre intérieur de la boîte dépasse 5 cm, sans toutefois être inférieur à dix fois le diamètre équivalent des plus grosses particules, dans le cas des sables. En pratique, une boîte carrée de 6 cm de côté est couramment utilisée pour ce type d'essai.

2.4.2 Reconstitution de l'échantillon

Les mélanges étudiés ont été élaborés en laboratoire avec des teneurs en caoutchouc variant de 0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % et 10 %. Les échantillons ont été confectionnés selon la méthode de pluviation à sec, en maintenant une densité relative élevée, fixée à 90 %. Par la suite, ces échantillons ont été soumis à trois niveaux de contraintes normales : 100 kPa, 200 kPa et 400 kPa. La détermination de la quantité de matériau correspondant aux différents états a été réalisée à partir des paramètres suivants : la densité relative (D_r), l'indice des vides minimum (e_{min}) et l'indice des vides maximum (e_{max})

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

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

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

Ou bien :

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

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

(V_t = volume du moule est 90 cm³).

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

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

Tableau 2.2 : Les masses calculées pour les échantillons testés.

Pourcentage des granulés de caoutchouc (%)	Densité relative Dr (%)	Masse de sol (g) D ₅₀ = 1mm	Masse de sol (g) D ₅₀ = 2mm	Masse de sol (g) D ₅₀ = 3.15mm
0	90	155.42799	163.40038	153.96218
2.5	90	152.44275	160.2896	155.08972
5	90	149.69754	152.78976	150.16472
7.5	90	141.75104	142.73944	145.90091
10	90	137.06431	143.66584	137.46164

2.4.3 Exécution de l'essai

Réalisation de l'essai sur au moins 3 échantillons, avec contraintes normales différents (100, 200 et 400 kPa), Séchage préalable au matériau avant l'essai.

Préparation de l'échantillon:

- Installer les plaques Dans la boîte de cisaillement,
- Remplir la boîte avec sable par chute libre a l'aide d'un entonnoir,
- Fixer la boîte sur le dispositif,
- Enlever les fixations des deux demi-boîtes,
- Zéro sur le capteur vertical.

Essai de cisaillement :

- régler la vitesse de chariot : 1mm/min,
- Appliquer les contraintes normales prévues (100, 200 et 400 kPa) via des poids,
- Démarré l'essai cisaillement.

2.4.4 Traitement des résultats :

1. A la fin de l'essai, on dispose de trois paramètres mesures :
 - L'effort de cisaillement (T),
 - Le déplacement horizontal Δh,
 - Le déplacement vertical Δv.
2. Calcule de la contrainte de cisaillement(τ) à partir de l'effort T et de la surface de cisaillement (τ= T/A),

3. Tracer les courbes $\tau - \Delta h$, pour chaque contrainte normale appliquée (100, 200 et 400 kPa),
4. Détermination de τ_{\max} , Identifier sur chaque courbe la valeur maximale de τ_{\max} , correspondant au pic de contrainte de cisaillement,
5. Tracer les points (τ_{\max}, σ) , Reporter sur un même graphique les points formes par les couples (τ_{\max}, σ) , ou σ est la contrainte normale appliquée,
6. Tracer la droite Mohr-Coulomb (τ_{\max}, σ) ,
7. Détermination les paramètres de résistance au cisaillement, l'angle de frottement ϕ et la cohésion C .

2.4.4 Lectures

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

2.5 Conclusion

Ce chapitre présente l'appareillage utilisé dans cette étude (l'appareil de cisaillement direct), ainsi que les méthodes expérimentales pour étudier le comportement mécanique des mélanges de sable de Chlef renforcés par le granulés caoutchouc, avec des proportions variables (0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % et 10 %), et différentes tailles moyennes de grains (D_{50}). Les échantillons ont été préparés en laboratoire par la méthode de pluviation à sec, en respectant une densité relative élevée fixée à 90 %. Trois niveaux de contrainte normale initiale ont été appliqués : 100 kPa, 200 kPa et 400 kPa. De plus, les propriétés physiques des mélanges sable-granulés de caoutchouc ont été présentées.

Les chapitres suivants s'attacheront à analyser la réponse mécanique de ces mélanges, en particulier l'influence combinée de la teneur en caoutchouc et le diamètre moyen sur le comportement du sable.

CHAPITRE 3

IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC

3.1. Introduction

La résistance au cisaillement des sols granulaires continue de susciter un grand intérêt tant sur le plan académique que pratique. Parmi les paramètres influençant cette résistance, la taille des grains et les caractéristiques granulométriques jouent un rôle important. Bien que ce sujet ait été abordé dans plusieurs études (Lee et Fitton 1968 ; Finn et al., 1970 ; Ishihara et al., 1975 ; Miura et al., 1994 ; Lim et al., 2012 ; Belkhatir et al., 2014 ; Cherif Taiba et al., 2017 ; Hazout et al., 2018 ; Monkul et al., 2021 ; Megrouse et al., 2025), les conclusions restent incomplètes et nécessitent davantage d'approfondissements expérimentaux et théoriques. Lee et Fitton (1968) ont souligné l'influence notable de la distribution granulométrique sur la résistance au cisaillement des sols. Par ailleurs, Vaid et al. (1991) ont analysé l'impact du coefficient d'uniformité (C_u) sur la réponse mécanique cyclique de trois échantillons de sable ayant le même diamètre médian (D_{50}). Leurs résultats montrent qu'une augmentation du coefficient C_u améliore la résistance à la liquéfaction sous chargement cyclique pour des densités relatives faibles, mais cet effet s'inverse lorsque la densité relative est élevée. Cherif Taiba et al. (2017) ont mis en évidence une influence significative de la taille des grains sur le comportement mécanique non drainé des mélanges sable-limon. Hazout (2018) a, quant à lui, indiqué que le diamètre moyen des grains (D_{50}) exercent un contrôle marqué sur la résistance au cisaillement non drainée des sols sableux. En particulier, il a observé que cette résistance augmente lorsque D_{50} varie de 0,25 mm à 1,00 mm. Dans une étude récente, Wang et al. (2022) ont examiné l'effet de la taille des particules sur les propriétés de cisaillement en conditions de grands déplacements et après traitement thermique. Ils ont montré que la distribution granulométrique influence fortement la résistance au cisaillement, les particules fines générant une résistance résiduelle plus élevée. Enfin, Megrouse et al. (2024) ont constaté que les propriétés mécaniques des sols granulaires s'améliorent avec l'augmentation de D_{50} , notamment dans la plage de 1 à 2 mm, où une nette amélioration de la résistance au cisaillement a été observée pour tous les échantillons reconstitués.

De plus, jusqu'à présent, aucune relation claire n'a été établie entre les caractéristiques granulométriques et la résistance au cisaillement des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc. A cet effet, nous allons présenter dans ce chapitre des essais à la boîte de cisaillement direct en vue de clarifier et d'étudier l'impact de la taille des grains mettant l'accent sur l'effet des diamètres moyen (D_{50}). Les échantillons de sable ont été reconstitués

CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC

au laboratoire avec différents diamètres moyens ($D_{50}=3.15$ mm, 2 mm et 1 mm) et ayant mêmes diamètres extrêmes; maximal et minimal ($D_{max}=4$ mm et $D_{min}=0.08$ mm). Tous les échantillons ont été reconstitués avec pluviométrie à sec à une densité relative initiale dense ($Dr=90\%$) et soumis à trois contraintes normales initiales ($\sigma_n= 100, 200$ et 400 kPa).

3.2. Résultats des essais de cisaillement direct

3.2.1. Contrainte normale initiale, $\sigma_n=100$ kPa

Les figures 3.1 à 3.5 présentent les résultats des essais de cisaillement direct à la boîte pour l'objet d'analyser l'influence du diamètre moyen, ($D_{50} = 3.15, 2$ et 1 mm) sur la réponse mécanique des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc, ayant des diamètres ; maximal et minimal constants ($D_{max}=4$ mm et $D_{min}=0.08$ mm) pour les trois classes granulaires. Les mélanges sable-granulés de caoutchouc varient de 0 à 10 % ont été préparés en utilisant la technique de la pluviométrie à sec avec une densité relative initiale de ($Dr=90\%$) et soumis à une contrainte normale initiale faible ($\sigma_n=100$ kPa). En général, les résultats des différents essais indiquent que paramètre de la taille des grains en termes du diamètre moyen à une influence très significative sur la résistance au cisaillement du sable pour les cinq fractions de granulés de caoutchouc considérées. Les échantillons des mélanges sable-granulés de caoutchouc avec un diamètre moyen $D_{50} = 3.15$ mm indiquent une augmentation de la résistance au cisaillement de (27%, 20%, 18%, 9% et 10%) considérant les cinq fractions de caoutchouc ($R_c=0\%$, 2.5%, 5%, 7.5% et 10%) respectivement, en comparaison aux échantillons du sable de même groupe ayant un diamètre moyen $D_{50} = 1$ mm comme illustré sur les figures 3.1a à 3.5a. La tendance de la résistance au cisaillement observée est due à l'augmentation du diamètre moyen qui induit une augmentation remarquable de la taille des particules. En d'autre terme, le diamètre moyen de $D_{50}=3.15$ mm induit des échantillons ayant des particules plus grossières par rapport aux échantillons préparés avec un diamètre moyen de 2 mm et devient très prononcé par rapport aux échantillons reconstitués avec un diamètre moyen de 1 mm (50% des particules d'échantillons ayant des diamètres supérieurs aux ; 2,1 et 0,63 mm pour les trois diamètres moyens ; $D_{50} = 3.15, 2$ et 1 mm respectivement). Les résultats de la présente étude sont en bon accord avec les travaux expérimentaux des essais triaxiaux non drainés rapporté par (Hazout et al. 2018 ; Megrouse et al., 2024).

Les figures (3.1b, 3.2b, 3.3b, 3.4b et 3.5b) illustrent l'évolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal considérant l'impact du diamètre moyen (D_{50}). Les

CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC

résultats obtenus confirment le rôle de ce paramètre, que l'augmentation du diamètre moyen induit une amplification importante de phase de dilatance pour les cinq mélanges du sable de Chlef- granulés de caoutchouc à l'étude.

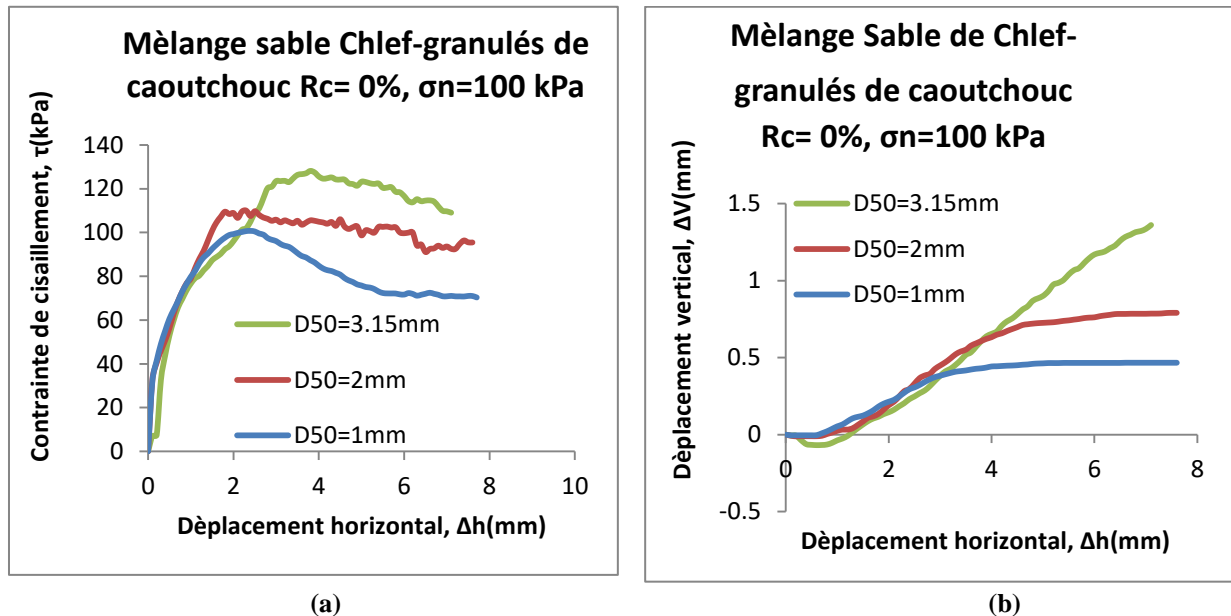
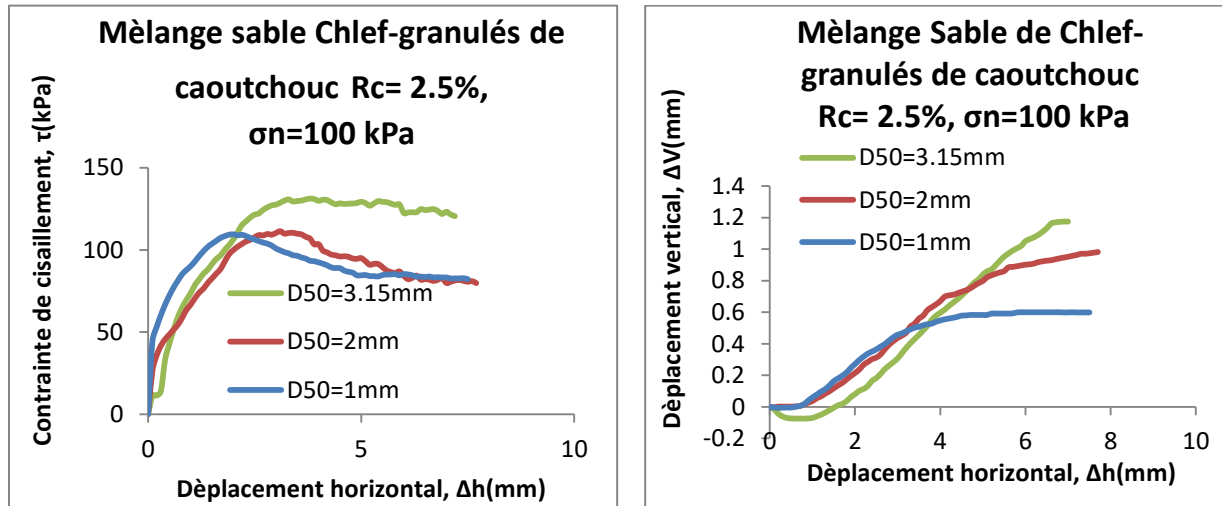


Figure 3.1: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=0\%$, $\sigma_n=100$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale

CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC

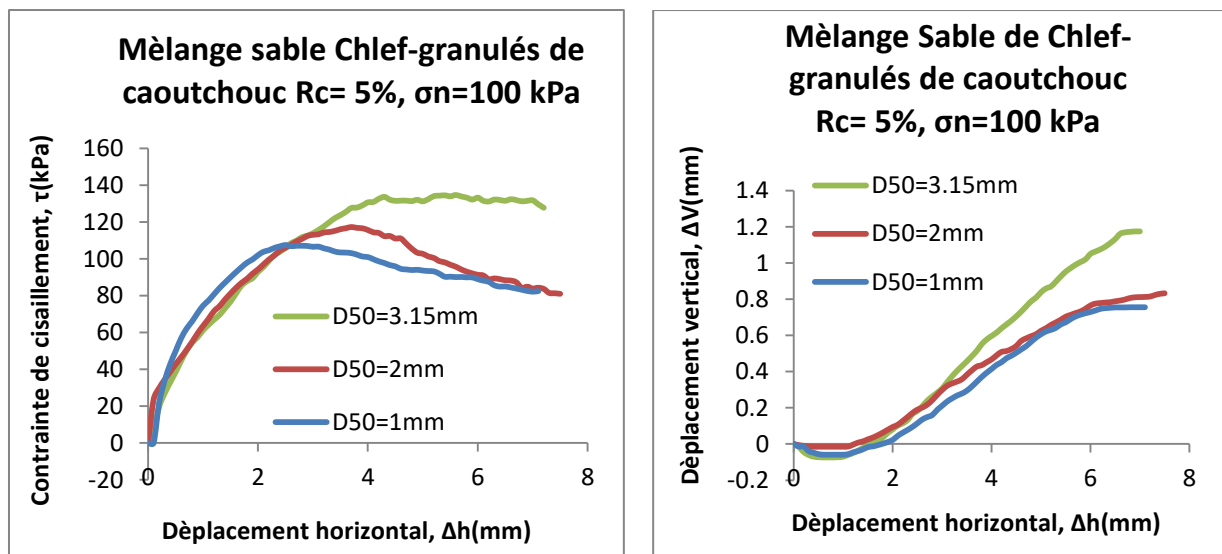


(a)

(b)

Figure 3.2: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=2.5\%$, $\sigma_n=100$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale



(a)

(b)

Figure 3.3: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=5\%$, $\sigma_n=100$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale

CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC

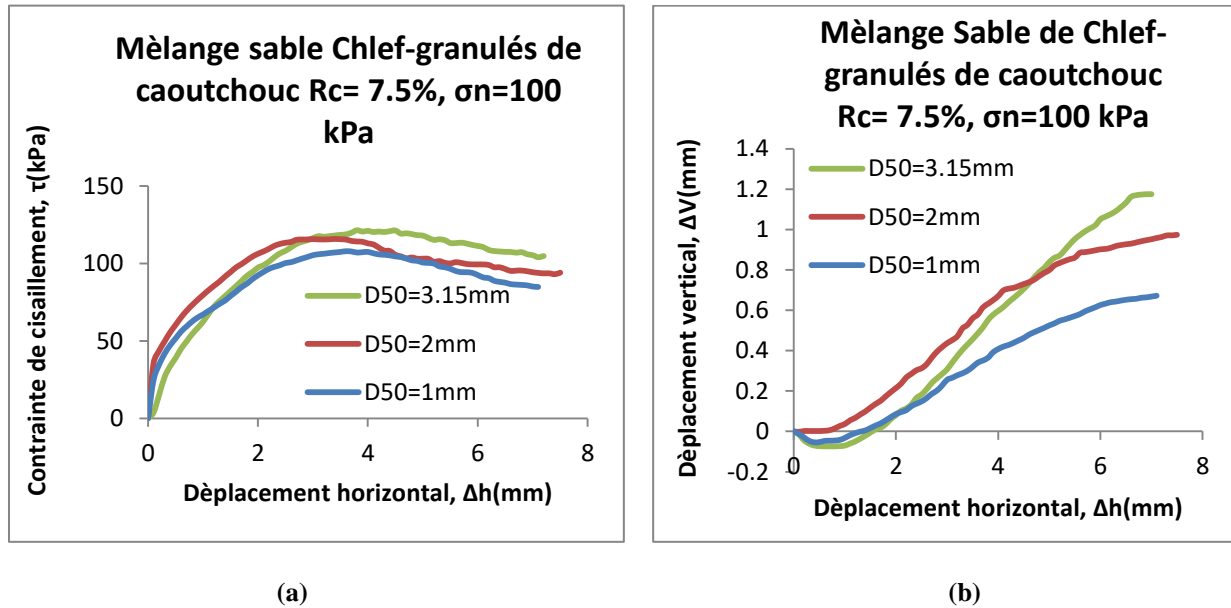


Figure 3.4: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=7.5\%$, $\sigma_n=100$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale

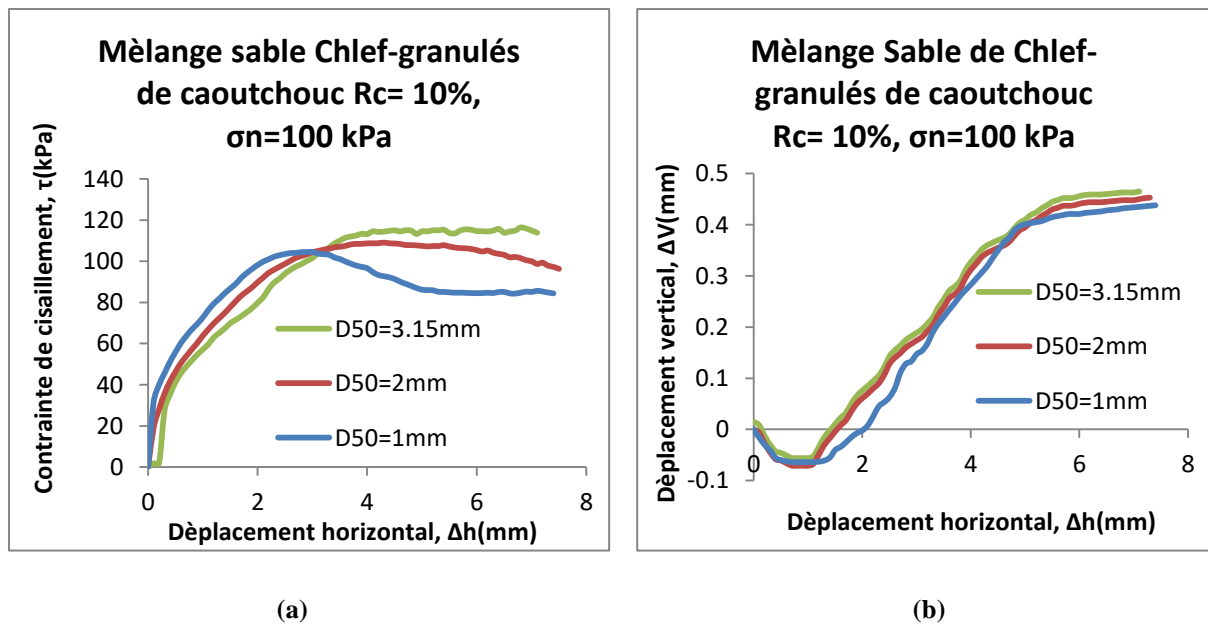


Figure 3.5: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=10\%$, $\sigma_n=100$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale

3.2.2 Contrainte normale initiale, $\sigma_n=200$ kPa :

Une série d'essais de cisaillement direct a été menée en utilisant la boîte de Casagrande pour examiner l'effet de la taille des grains en terme du diamètre moyen ($D_{50}=3.15, 2$ et 1 mm) sur

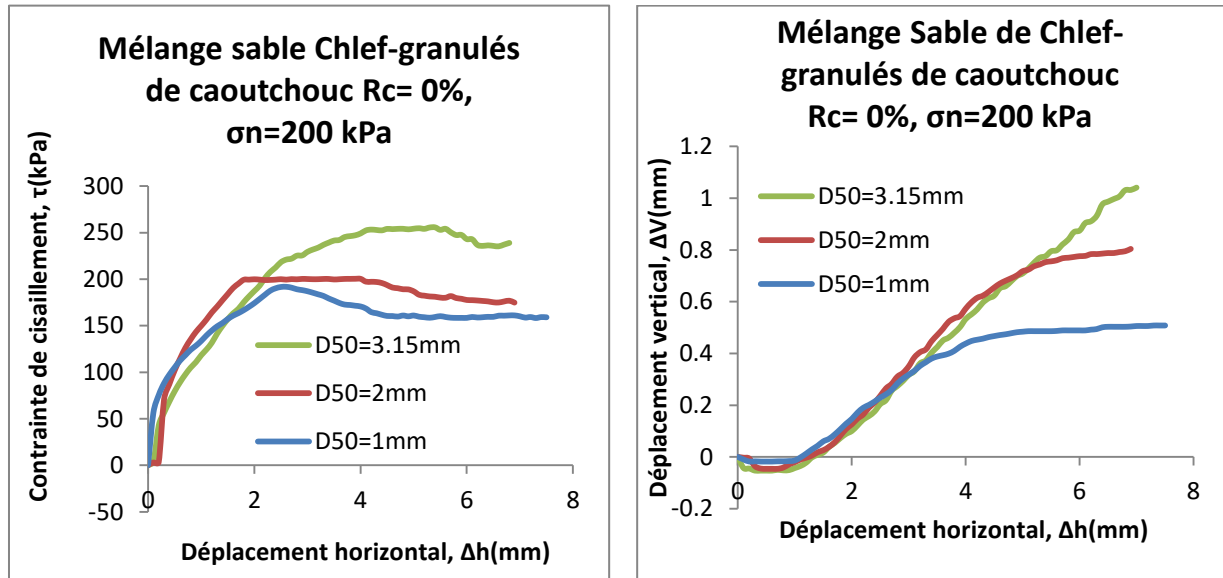
CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC

le comportement mécanique du mélange sable de Chlef-granulés de caoutchouc. Les Figures 3.6 à 3.10 ont été établies dans ce but. Les échantillons des mélanges sable de Chlef granulés de caoutchouc ont été préparés en laboratoire par la méthode de dépôt à sec, avec une densité relative de 90% (état dense), et soumis à une contrainte normale initiale de 200 kPa.

À partir de ces figures, il est notable que la résistance au cisaillement augmente de manière progressive avec l'augmentation du diamètre moyen pour cinq fractions de granulés de caoutchouc considérées. Les échantillons des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc reconstitués avec un diamètre moyen de $D_{50}=3.15$ mm montrent une augmentation de la résistance au cisaillement de 11%, 24%, 15%, 11% et 9%) pour les cinq teneur en granulés de caoutchouc ($R_c=0\%$, 2.5%, 5%, 7.5% et 10%) respectivement, par rapport aux échantillons caractérisés par un $D_{50}=1$ mm, comme illustré dans les Figures 3.6a, 3.7a et 3.8a, 3.9a et 3.10a. De plus, en comparant ces résultats obtenus, il est clair que l'impact du diamètre moyen est particulièrement significatif sur la résistance au cisaillement pour la la fraction de 2.5 % granulés de caoutchouc ($R_c=2.5\%$, augmentation de 24%), par rapport aux autres échantillons (pour $R_c=0\%$, augmentation de 11%, pour $R_c=5\%$, augmentation de 15%, pour, $R_c=7.5\%$, augmentation de 11%, et pour $R_c=10\%$, augmentation de 9%).

Les Figures (3.6b- 3.10b) montrent la variation du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal en prenant en compte l'influence du diamètre moyen. Les résultats obtenus confirment que le paramètre du diamètre moyen joue un rôle important dans l'augmentation progressive de la phase de dilatance avec l'augmentation de ce diamètre (3.15 mm, 2 mm et 1mm).

CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC

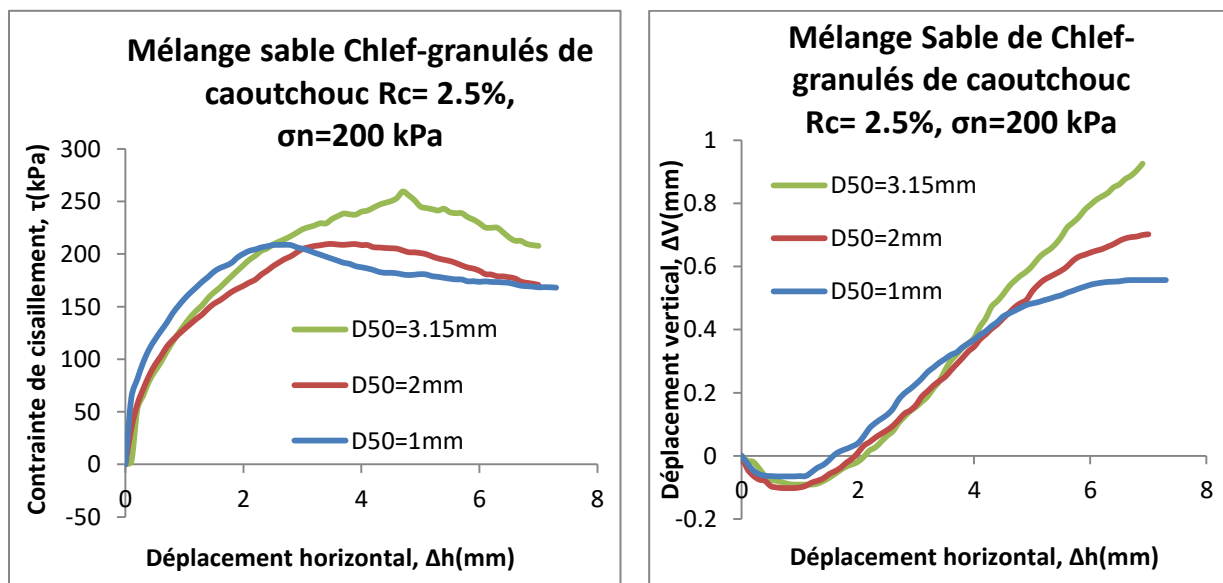


(a)

(b)

Figure 3.6: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=0\%$, $\sigma_n=200$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale



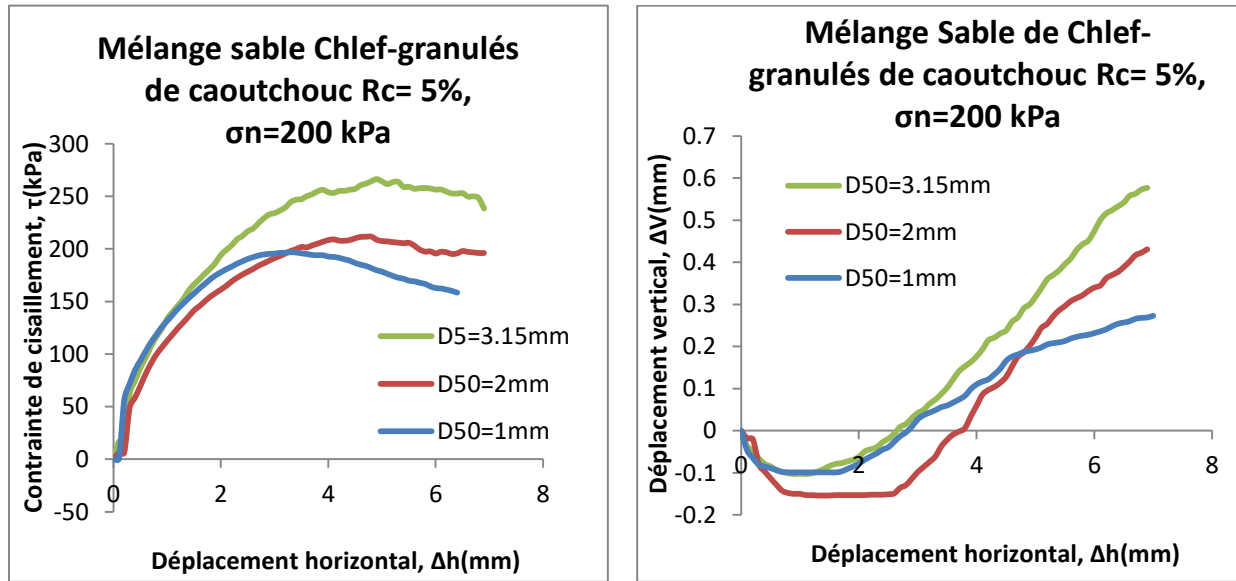
(a)

(b)

Figure 3.7: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=2.5\%$, $\sigma_n=200$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale

CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC



(a)

(b)

Figure 3.8: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=5\%$, $\sigma_n=200$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale



(a)

(b)

Figure 3.9: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=7.5\%$, $\sigma_n=200$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale

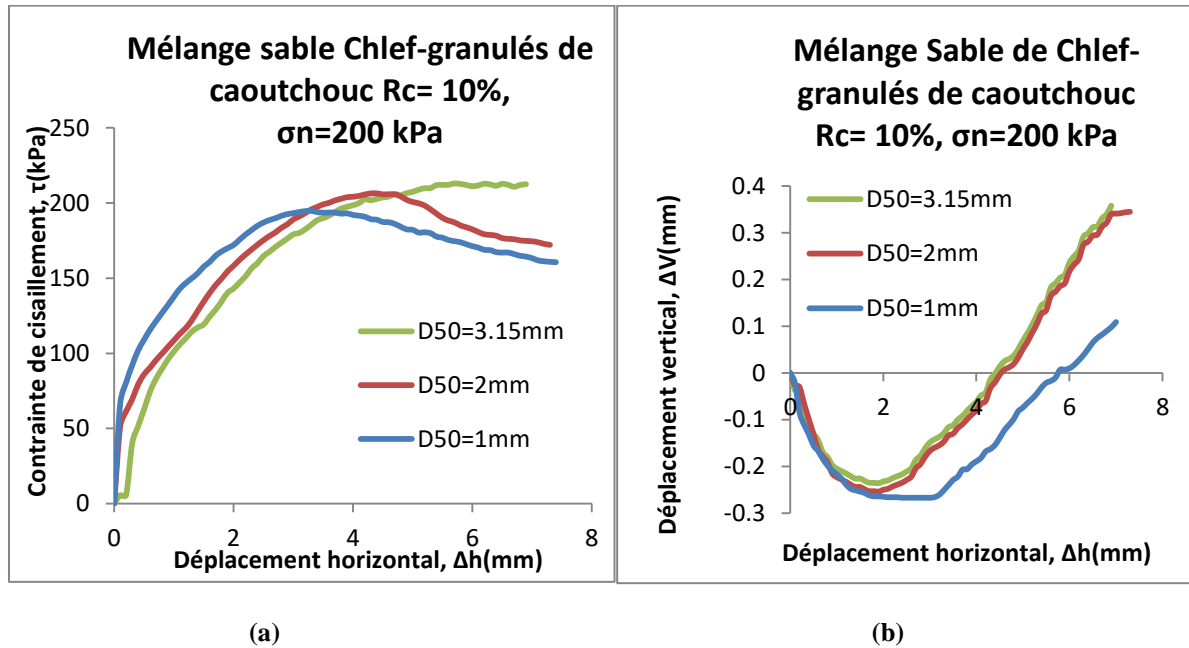


Figure 3.10: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=10\%$, $\sigma_n=200$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale

3.2.3 Contrainte normale initiale, $\sigma_n=400$ kPa :

L'influence du diamètre moyen sur la résistance au cisaillement des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc est clairement illustrée dans cette section. Les figures 3.11-3.15 reproduisent les résultats des essais obtenus à partir de la présente étude. Les échantillons ont été reconstitués avec les mêmes diamètres extrêmes; maximal et minimal ($D_{max}=4$ mm et $D_{min}=0.08$ mm) et différents diamètres moyens ($D_{50}= 3.15, 2$ et 1 mm). Les échantillons ont été préparés au laboratoire avec la méthode de pluviation à sec avec un état dense ($D_r= 90\%$) et soumis à une contrainte normale initiale élevée ($\sigma_n=400$ kPa). D'après cette figure, On observe que la résistance au cisaillement augmente progressivement avec les trois diamètres moyens pour toutes les fractions de granulés de caoutchouc à l'étude. Les résultats obtenus indiquent que les échantillons du sable avec ($D_{50}= 3.15$ mm) atteints des résistances au cisaillement plus élevées ($\tau_{max} = 459.36$ kPa, 482.16 kPa, 492.55 kPa, 435.76 kPa et 419.54 kPa) en comparaison avec ($D_{50}= 2$ mm) ; ($\tau_{max} = 420.87$ kPa, 432.41 kPa, 422.19 kPa, 412.67 kPa et 407.33 kPa) et devient très prononcée par apport le diamètre moyen ($D_{50}= 1$ mm) ; ($\tau_{max} = 400.1$ kPa, 414.3 kPa, 420.56 kPa, 403.6 kPa et 401.14 kPa) pour les cinq fraction de granulés de caoutchouc ($R_c=0, 2.5, 5, 7.5$ et 10%), respectivement comme présenté sur les figures (3.11a-3.15a). En outre, l'analyse comparative des résultats présentés dans ces figures révèle

CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC

que l'effet du diamètre moyen (D_{50}) sur la résistance au cisaillement est particulièrement marqué pour la fraction contenant 5 % de granulés de caoutchouc, avec un taux d'augmentation de la résistance atteignant 17 %. Ce taux est supérieur à celui observé pour les autres fractions : 15 % pour $R_c = 0\%$, 16 % pour $R_c = 2,5\%$, 8 % pour $R_c = 7,5\%$ et 5 % pour $R_c = 10\%$. Où, ce taux d'augmentation représente l'augmentation de la résistance au cisaillement de ces mélanges ayant un diamètre moyen de 3.15 mm par rapport aux mêmes mélanges préparés avec un diamètre moyen de 1 mm dans des conditions identiques.

Le plan de déplacement vertical-horizontal indique clairement le rôle du paramètre du diamètre moyen que la phase de la dilatance augmente d'une manière très remarquable avec l'augmentation du diamètre moyen pour les cinq fraction de granulés de caoutchouc considérées comme illustré sur les figures (3.11b et 3.15b).

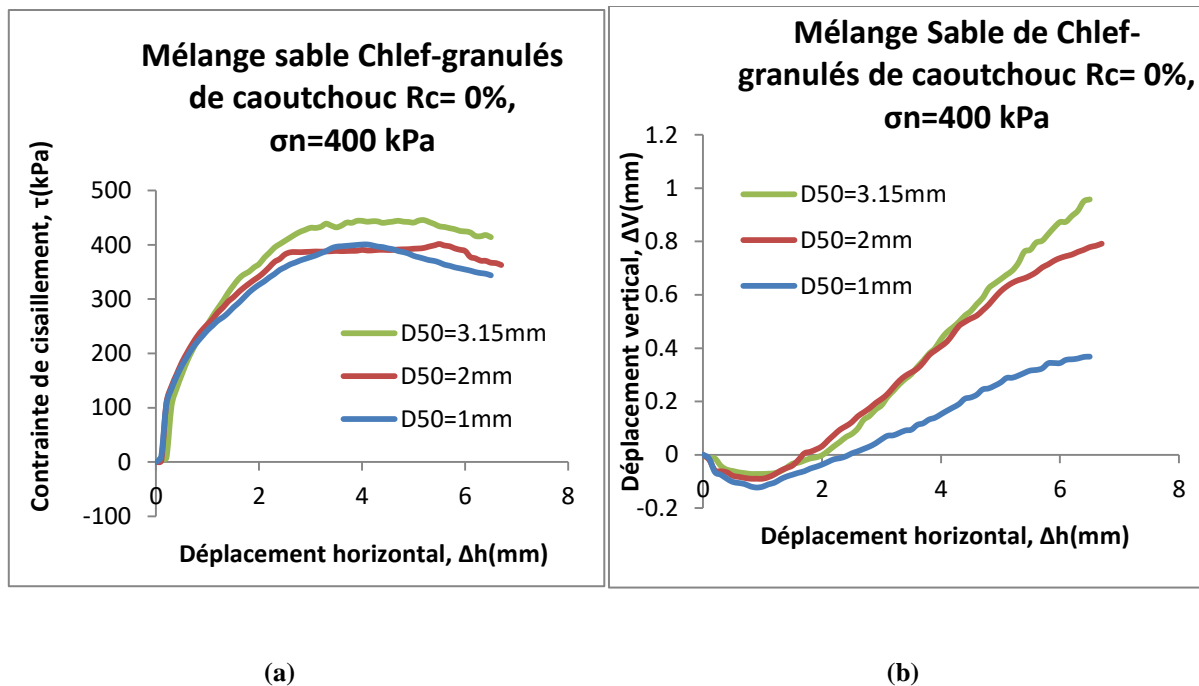
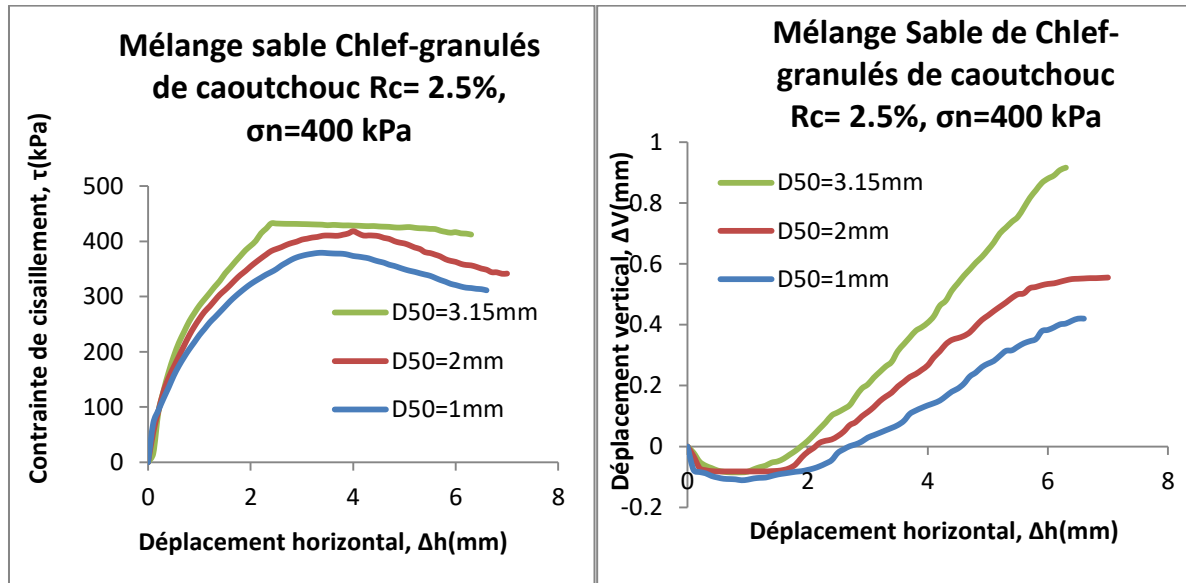


Figure 3.11: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=0\%$, $\sigma_n=400$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale

CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC

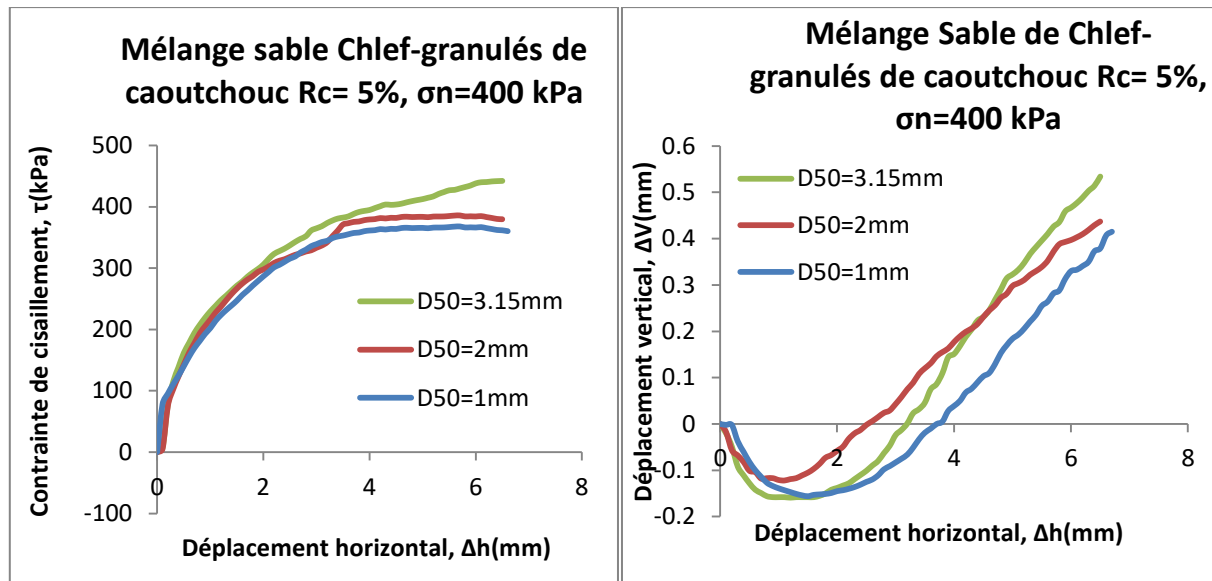


(a)

(b)

Figure 3.12: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=2.5\%$, $\sigma_n=400$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale



(a)

(b)

Figure 3.13: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=5\%$, $\sigma_n=400$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale

CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC

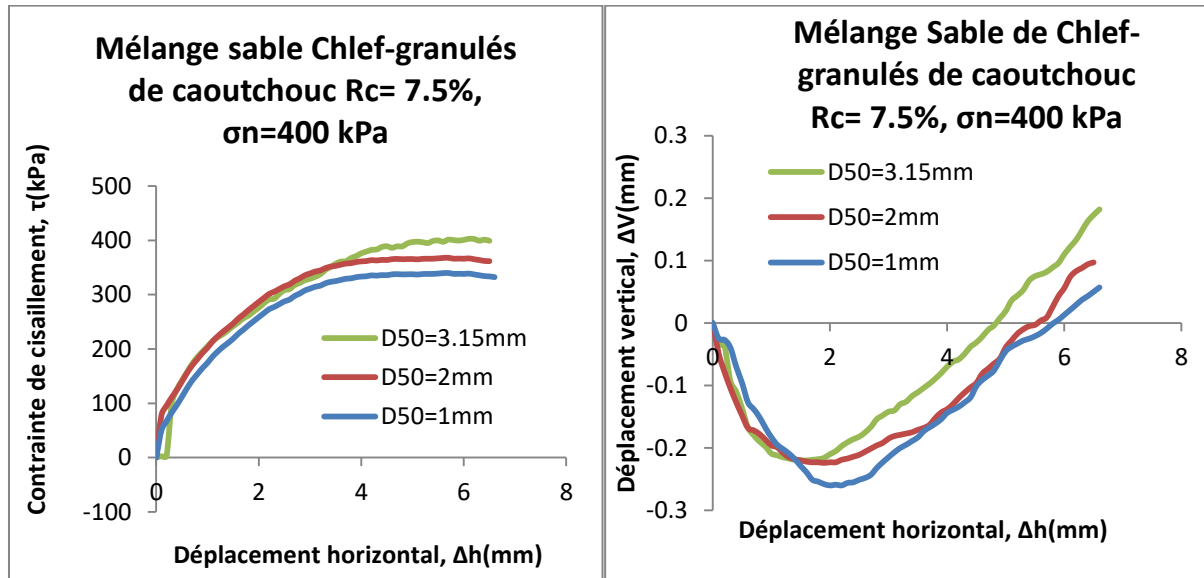


Figure 3.14: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=7.5\%$, $\sigma_n=400$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale

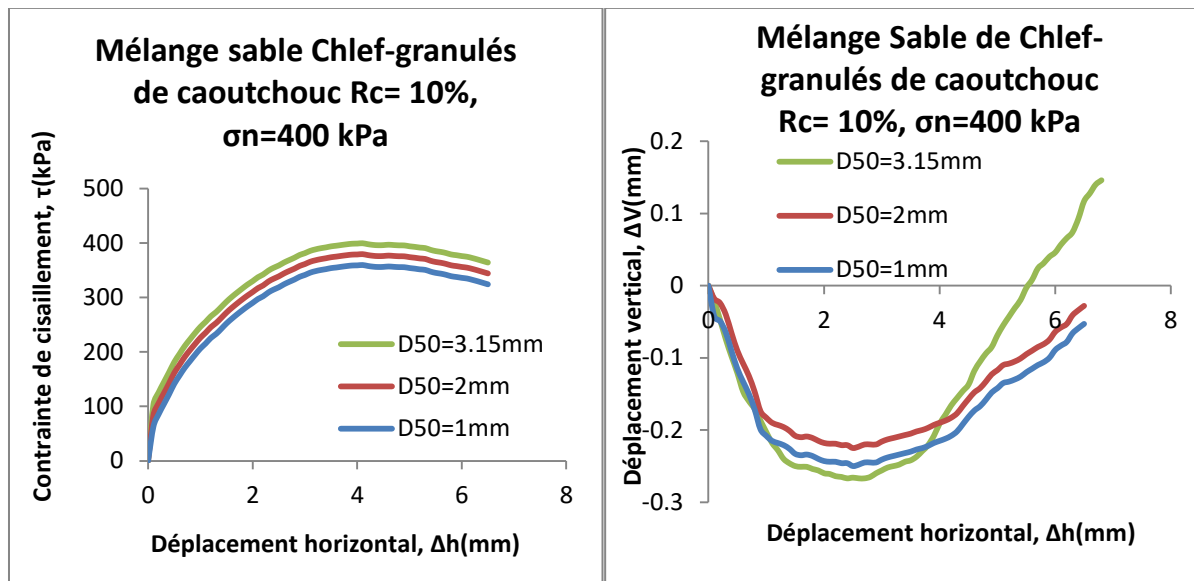


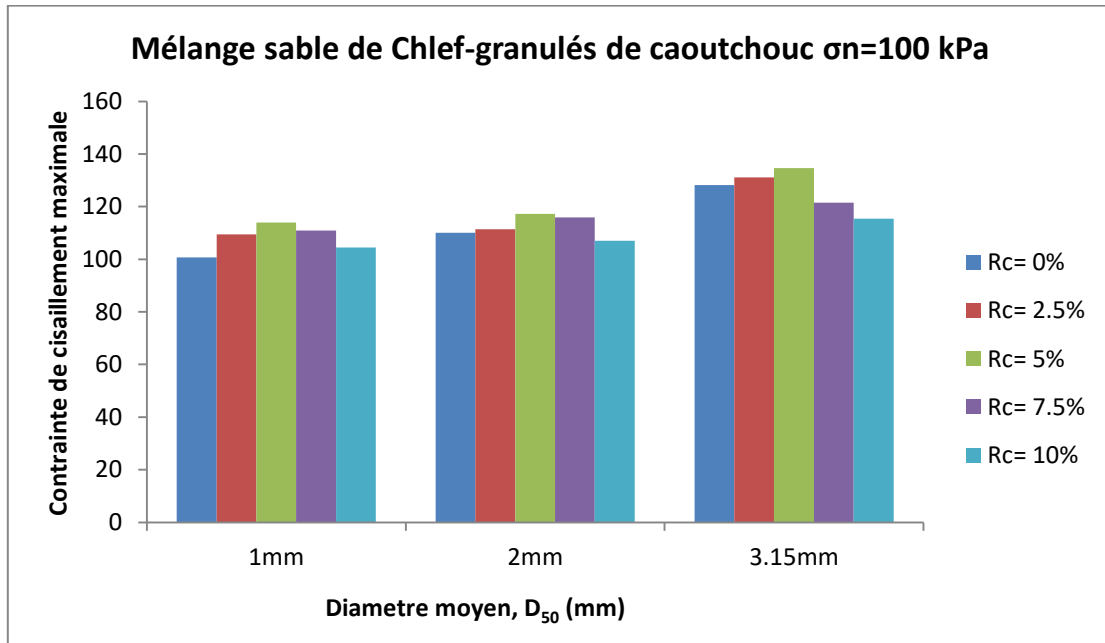
Figure 3.15: Effet du diamètre (D_{50}) sur le comportement mécanique des mélanges sables-granulés de caoutchouc ; ($R_c=10\%$, $\sigma_n=400$ kPa).

(a)-Evolution de contrainte de cisaillement ; (b)-Evolution de déplacement verticale

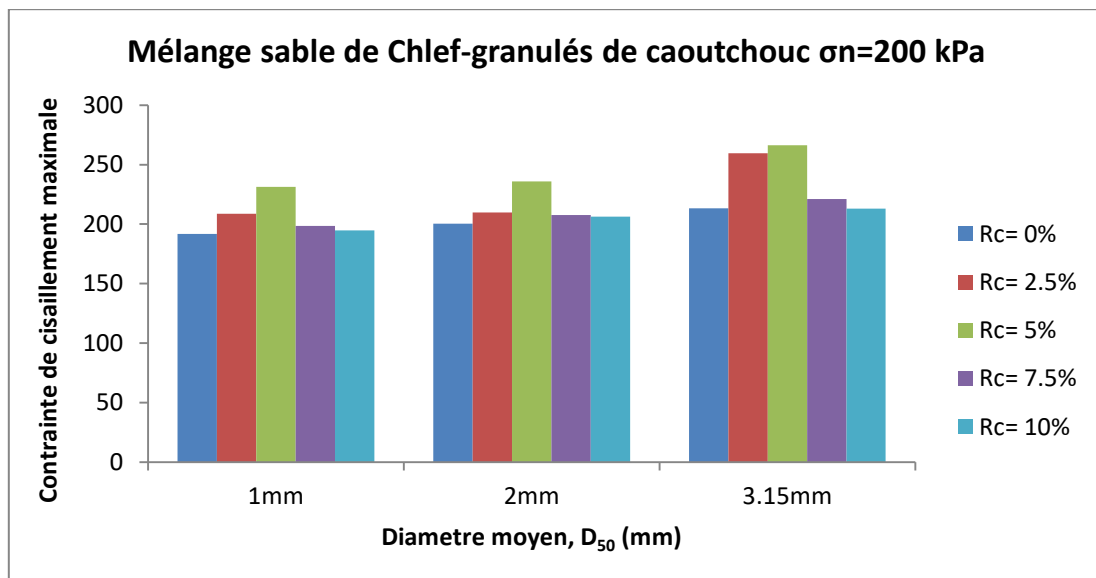
3.3. Effet de diamètre moyen (D_{50}) sur la résistance au cisaillement maximale des mélanges sable-granulés de caoutchouc

La Figure 3.16 récapitule les résultats de comportement mécanique obtenus dans ce chapitre (Figures 3.1- 3.15), en étudiant l'influence des caractéristiques granulométriques en termes du diamètre moyen (D_{50}) sur la résistance au cisaillement maximale des classes granulaires des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc. Les échantillons ont été préparés avec une densité relative initiale de 90% (état dense) et soumis à trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 400 kPa). Les échantillons des mélanges sable-granulés de caoutchouc ont été reconstitués au laboratoire ayant différents diamètres moyens ($1 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 3.15 \text{ mm}$) pour les mêmes diamètres extrêmes ($D_{\max} = 4 \text{ mm}$ et $D_{\min} = 0.08 \text{ mm}$). A partir de cette figure, on peut constater que la résistance au cisaillement maximale augmente avec l'augmentation du diamètre moyen des grains ($D_{50} = 1.0 \text{ mm}, 2.0 \text{ mm}, 3.15 \text{ mm}$) pour toute la gamme de teneur en granulés de caoutchouc et les trois contraintes normales initiales à l'étude. Cette réponse de l'augmentation de résistance au cisaillement maximale est due à l'augmentation du diamètre moyen qui induit une augmentation remarquable de la taille des particules (pour $D_{50} = 3.15 \text{ mm}$; 50% des particules d'échantillons ont été prélevés sur la fraction (entre 3.15 mm à 4 mm), pour $D_{50} = 2 \text{ mm}$; 50% des particules d'échantillons ont été prélevés sur la fraction (entre 2 mm à 4 mm) et pour $D_{50} = 1 \text{ mm}$; 50% des particules d'échantillons ont été prélevés sur la fraction (entre 1 mm à 4 mm)). De plus, les résultats des différents mélanges montrent que l'influence du diamètre moyen des grains sur la résistance au cisaillement est particulièrement marquée sous une faible contrainte normale initiale ($\sigma_n = 100 \text{ kPa}$), comparativement aux échantillons soumis à des contraintes normales plus élevées ($\sigma_n = 200 \text{ kPa}$ et 400 kPa). Cependant, on constate aussi que la résistance au cisaillement maximale augmente d'une façon remarquable avec l'augmentation de la contrainte normale initiale pour tous les paramètres considérés.

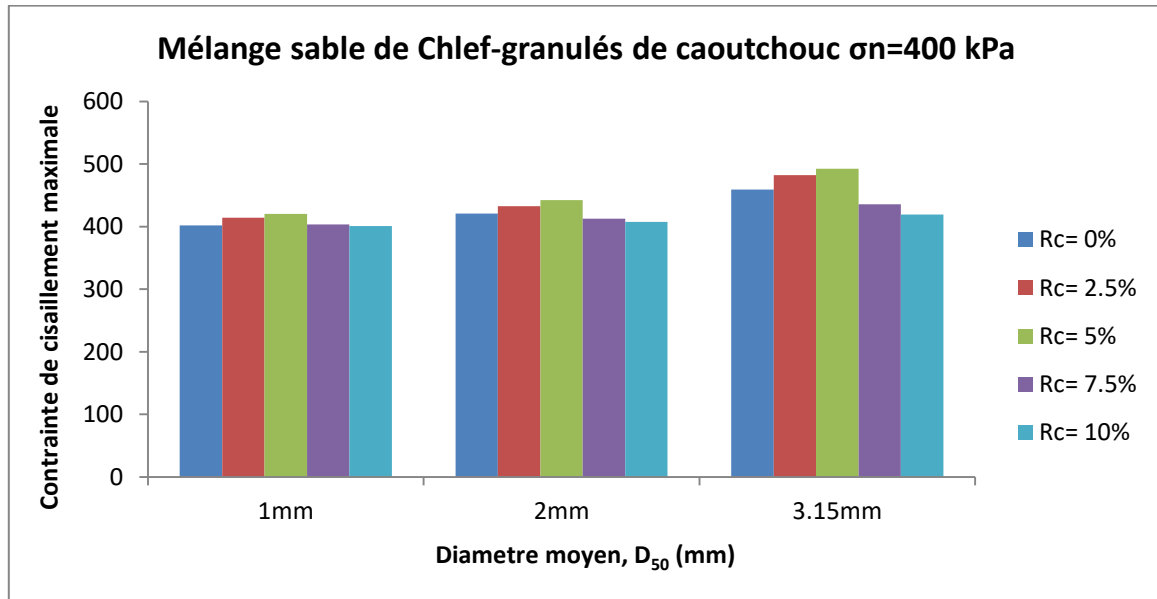
CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC



(a)



(b)



(c)
Figure 3.16: Effet de D_{50} sur la résistance au cisaillement maximale
 (a) – $\sigma_n=100$ kPa, (b) - $\sigma_n=200$ kPa, (c) - $\sigma_n=400$ kPa

4.4. Influence du diamètre moyen des grains sur l'angle de frottement

Dans le but d'évaluer l'impact de la taille des grains, exprimée en termes de diamètre moyen ($D_{50}=1, 2$ et 3.15 mm), sur l'angle de frottement (φ) des échantillons des mélanges sable de Chlef-granulés de caoutchouc. 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 ($D_r=90\%$), la Figure 3.17 présente les résultats obtenus pour cette section. Les mélanges testés contiennent des proportions des fractions de granulés de caoutchouc de « Rc=0 %, 2.5 %, 5, 7.5 et 10 % ». Les résultats montrent que l'angle de frottement augmente avec l'augmentation de diamètre moyen des grains pour les cinq fractions de granulés de caoutchouc. Par exemple, l'augmentation du D_{50} de 1 à 3.15 mm pour le sable de Chlef renforcé par 5% de granulés de caoutchouc entraîne une amélioration de l'angle de frottement de 45.49° à $49,81^\circ$. De plus, il y a une corrélation très forte entre l'angle de frottement et le diamètre moyen des grains avec un coefficient de détermination (R^2) de 0,99 pour Rc= 0%, 2.5 et 5%, de 0,90 pour Rc= 7.5% et de 0,97 pour Rc= 10%. Par conséquent, une relation exponentielle a été proposée pour exprimer l'angle de frottement (φ) en fonction du diamètre moyen des grains (D_{50}) considérant toutes les fractions sélectionnées.

$$(\varphi) = a * e^{b * (D_{50})} \quad (3.1)$$

CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC

Les coefficients a, b et les coefficients de détermination R^2 pour les matériaux testés sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Coefficients a, b et R^2 pour équation (3.1)

Rc (%)	a	b	R^2
0	43.635	0.0314	0.9879
2.5	43.407	0.0419	0.9975
5	43.324	0.0454	0.9822
7.5	43.326	0.966	0.8779
10	44.512	0.0068	0.9558

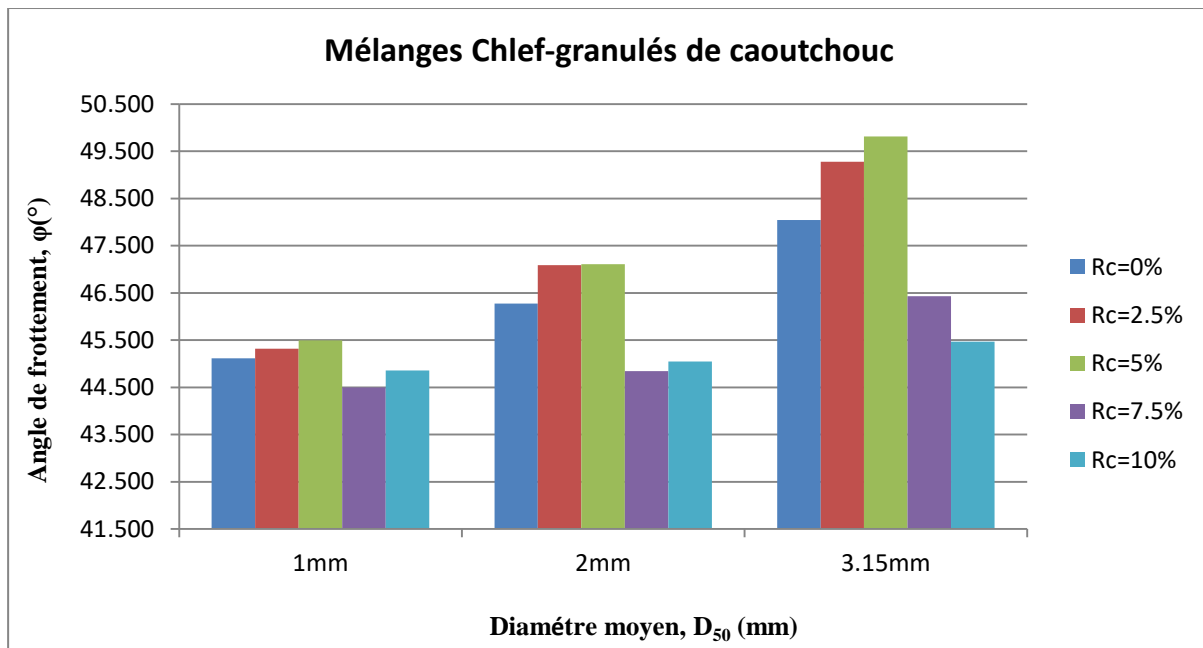


Figure 3.17: Effet de D_{50} sur l'angle de frottement.

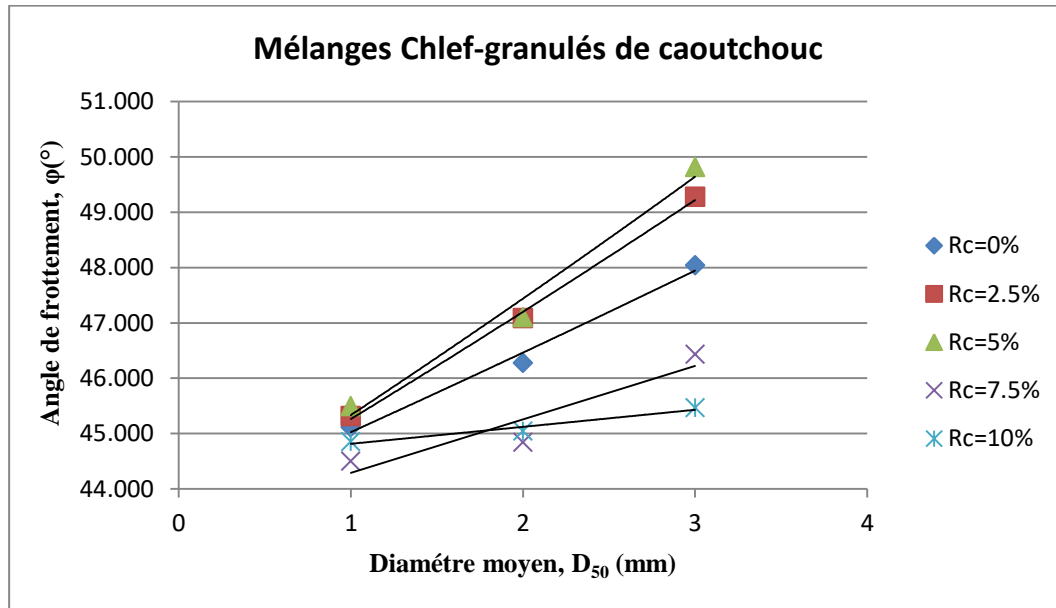


Figure 3.18: Courbe de tendance d'effet de D_{50} sur l'angle de frottement.

3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, des essais de cisaillement direct ont été menés pour le but d'étudier l'impact de la taille des grains, exprimée en termes de diamètre moyen, sur le comportement mécanique des échantillons de sable de Chlef renforcés par granulés de caoutchouc (Rc = 0%, 2.5 %, 5%, 7.5% et 10 %). Les échantillons de différents mélanges ont été préparés en laboratoire avec trois diamètres des grains moyens (D_{50} =3.15, 2 et 1 mm). Les différents mélanges ont été soumis à trois niveaux de contraintes normales initiales (σ_n =100, 200 et 400 kPa) avec une densité initiale dense (D_r =90%). Tous les échantillons ont été reconstitués avec les mêmes diamètres extrêmes; maximal et minimal (D_{max} =4mm et D_{min} = 0.08 mm). À la lumière des résultats expérimentaux obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

Les résultats des essais de cisaillement direct montrent clairement que la taille des grains, exprimée en termes de diamètre moyen (D_{50}), exerce une influence significative sur le comportement mécanique du sable de Chlef renforcé par des granulés de caoutchouc, notamment en ce qui concerne la résistance au cisaillement et l'angle de frottement interne.

Les résultats obtenus montrent clairement que l'augmentation de diamètre moyen des grains induit une augmentation de la résistance au cisaillement maximale pour tous les paramètres à l'étude. Cette réponse mécanique observée peut être expliquée par le fait que l'augmentation de diamètre moyen des grains avec (D_{50} =3.15mm) conduit à des échantillons ayant des particules plus grossières par rapport aux échantillons reconstitués par de diamètre moyen de 2mm et devient très prononcé par rapport aux échantillons préparés avec de

CHAPITRE 3 : IMPACT DU DIAMETRE MOYEN SUR LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MELANGES SABLE-GRANULES DE CAOUTCHOUC

diamètre moyen 1mm. Ces observations sont en bon accord avec celles rapportées dans la littérature par Hazout et al. (2018) et Megrousse et al. (2024).

L'analyse du plan de déplacement vertical-horizontal révèle également un rôle important du diamètre moyen : la phase de dilatance s'intensifie nettement avec l'augmentation de D_{50} , et ce, pour les cinq fractions de granulés de caoutchouc testées.

Les résultats montrent que l'angle de frottement augmente avec l'augmentation de diamètre moyen des grains pour les cinq fractions de granulés de caoutchouc. De plus, l'angle de frottement peuvent être corrélés avec le diamètre des grains (D_{50}) suivant une relation exponentielle pour tous cinq mélanges sélectionnés.

Enfin, il est noté que l'effet du diamètre moyen sur la résistance au cisaillement est particulièrement marqué sous une faible contrainte normale initiale ($\sigma_n = 100$ kPa), comparativement aux contraintes plus élevées ($\sigma_n = 200$ kPa et 400 kPa).

**CHAPITRE 4
EFFET DE L'INCORPORATION DE DE TENEUR EN
GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPOSE
MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES**

4.1. Introduction

De nombreuses études publiées ont examiné l'impact des granulés de caoutchouc sur les propriétés mécaniques des sols granulaires. Anvari et al. (2017) ont analysé comment la teneur en granulés de caoutchouc affecte la résistance au cisaillement du sable fin. Leurs résultats indiquent que cette teneur, ainsi que la densité relative, influencent le comportement contrainte-déplacement horizontal du mélange sable-caoutchouc. Ils ont observé un pic marqué sur les courbes contrainte-déplacement, lié à l'état critique. L'incorporation de granulés augmente la porosité du sable, ce qui pourrait expliquer une amélioration de la résistance au cisaillement due à un phénomène de densification durant le déplacement. Lopera Perez et al. (2018) ont mené une série d'essais triaxiaux monotones conventionnels, à la fois non drainés et drainés sous cisaillement constant, sur des mélanges composés de particules de sable (rigides) et de caoutchouc (souples), simulés à l'aide de la méthode des éléments discrets. Des échantillons lâches ont été constitués avec des proportions de caoutchouc comprises entre 0 et 30 % en poids, tous présentant le même indice de vide initial.

Les résultats ont montré que l'état d'instabilité était influencé par la teneur en caoutchouc, contrairement à l'angle de la ligne d'instabilité, qui est resté constant. En outre, les états d'instabilité atteints sous des contraintes plus élevées n'ont pas entraîné une amélioration significative de la résistance à la liquéfaction. Une augmentation de la teneur en caoutchouc a conduit à une diminution de la susceptibilité à la liquéfaction, l'échantillon contenant 30 % de caoutchouc ayant présenté une perte de résistance limitée. Aksoy et al. (2021) ont étudié l'effet des granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement du sable compacté à l'optimum Proctor. Leurs travaux montrent qu'un ajout de 5 % de granulés entraîne une augmentation de 13,8 % de l'angle de frottement interne, tandis que la cohésion diminue de 66,4 %. Au-delà de ce seuil, l'angle de frottement diminue et la cohésion remonte légèrement. Sung et al. (2022) ont évalué l'influence des granulés sur l'angle de frottement du sable. Dans le cas d'échantillons lâches, la résistance au cisaillement s'accroît avec l'ajout de granulés jusqu'à une proportion de 7,5 %, atteignant un angle maximal de 38,0°, avant de baisser légèrement à 10 %. En revanche, pour des échantillons denses, l'angle de frottement initial de 43,6° sans granulés diminue progressivement lorsqu'on y ajoute des granulés de caoutchouc.

Dans ce contexte, une série d'essais de cisaillement direct réalisés à l'aide d'une boîte de Casagrande a été menée afin d'évaluer l'influence de l'incorporation de granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique de trois classes granulaires de sable différentes,

CHAPITRE 4 : EFFET DE L'INCORPORATION DE TENEUR EN GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPOSE MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES

caractérisés par leur diamètre moyen ($D_{50} = 3,15$ mm, 2 mm et 1 mm). Les mélanges sable-caoutchouc ont été préparés en laboratoire par la méthode de la pluviation à sec à une densité relative de 90 %, (état dense). Ces échantillons ont ensuite été soumis à des essais de cisaillement direct sous trois niveaux de contrainte normale initiale distincts : 100, 200 et 400 kPa. Pour chacune des trois classes granulaires de sable, des essais ont également été effectués avec des teneurs en granules de caoutchouc variant de 0 à 10 %, par pas de 2,5 %. Cette étude vise à combler un gap existant dans la littérature scientifique concernant le renforcement des sols par des granules de caoutchouc, en prenant en compte l'effet du diamètre moyen des grains du sable utilisé.

4.2. Résultats des essais réalisés:

4.2.1. Diamètre moyen ; $D_{50}=3.15$ mm

L'influence de la teneur en granules de caoutchouc ($0\% \leq R_c \leq 10\%$) avec un pas de 2.5% sur la résistance au cisaillement des mélanges sable de Chlef-granules de caoutchouc ayant un diamètre moyen $D_{50}=3.15$ mm, est clairement discutée dans cette section. Les échantillons des mélanges sable renforcé par des granules de caoutchouc ont été reconstitués au laboratoire avec la technique de la pluviation à sec à une densité relative initiale de 90% (état dense) et soumis à trois contraintes normales initiales de 100, 200 et 400 kPa. Les figures 4.1 à 4.3 présentent les résultats des expériences menées dans le cadre de cette étude. Les résultats obtenus montrent clairement que la teneur en granules de caoutchouc influence significativement la résistance au cisaillement de la classe granulaire étudiée. Jusqu'à une teneur seuil de 5 %, l'ajout de granules entraîne une augmentation progressive de cette résistance par rapport au sable non renforcé ($R_c=0\%$). Les échantillons des mélanges sable-granules de caoutchouc avec $R_c = 5\%$ présentent une augmentation de la résistance au cisaillement au pic de 5 %, 25 % et 7 % pour les trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100, 200$ et 400 kPa) respectivement, en comparaison aux échantillons du sable propre de cette classe granulaire (sable non renforcé, $R_c=0\%$). En revanche, au-delà de ce seuil optimal de 5 %, on observe une diminution de la résistance au cisaillement. Par rapport aux échantillons contenant 5 % de granules de caoutchouc, ceux avec une teneur plus élevée ($R_c = 10\%$) indiquent une baisse de résistance de 14 %, 20 % et 15 % sous les mêmes contraintes normales initiales. Ces résultats suggèrent donc qu'incorporer des granules de caoutchouc jusqu'à 5% permet d'améliorer la résistance de sable de Chlef à densité élevée, mais que dépasser ce seuil à l'effet inverse et devient défavorable. Cette tendance peut être expliquée par l'effet de perte de frottement intergranulaire. Au-delà d'une teneur de $R_c=5\%$, les granules

CHAPITRE 4 : EFFET DE L'INCORPORATION DE TENEUR EN GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPOSE MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES

de caoutchouc commencent à remplacer de façon trop importante les grains de sable. Le frottement intergranulaire sable-sable, qui contribue grandement à la résistance du matériau, se trouve alors fortement diminué au profit d'un frottement sable-granulés moins efficace. De plus, une trop grande quantité de granulés peut empêcher la formation d'une structure granulaire dense et réduire les contacts intergranulaires en perturbant l'arrangement des grains de sable.

Comme illustré dans les figures (4.1b, 4.2b et 4.3b), la présence de granulés de caoutchouc influe également sur la phase de dilatance du sable. Lorsque la fraction de granulés augmente jusqu'à $R_c = 5\%$, une augmentation progressive de la dilatance est observée. Cependant, au-delà de cette valeur, la phase de dilatance diminue, ce qui correspond à une réduction de la résistance au cisaillement. Ainsi, la fraction de granulés de caoutchouc joue un rôle crucial dans l'évolution du comportement mécanique des matériaux testés.

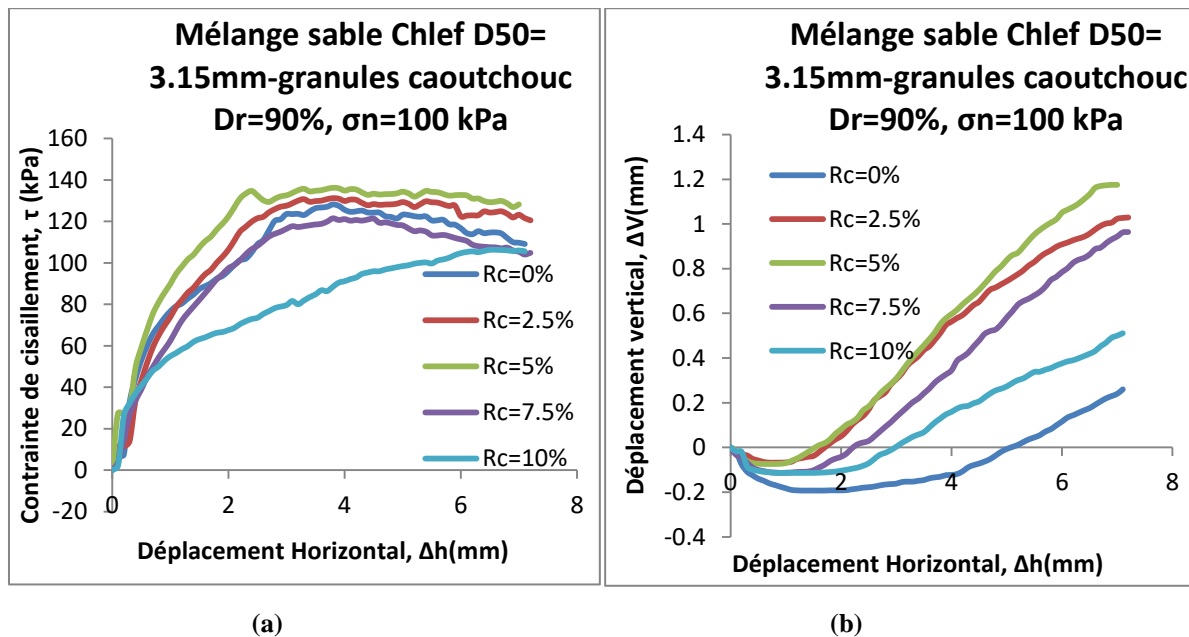


Figure 4.1 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=3.15$ mm ; $\sigma_n=100$ kPa)

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

CHAPITRE 4 : EFFET DE L'INCORPORATION DE TENEUR EN GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPOSE MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES

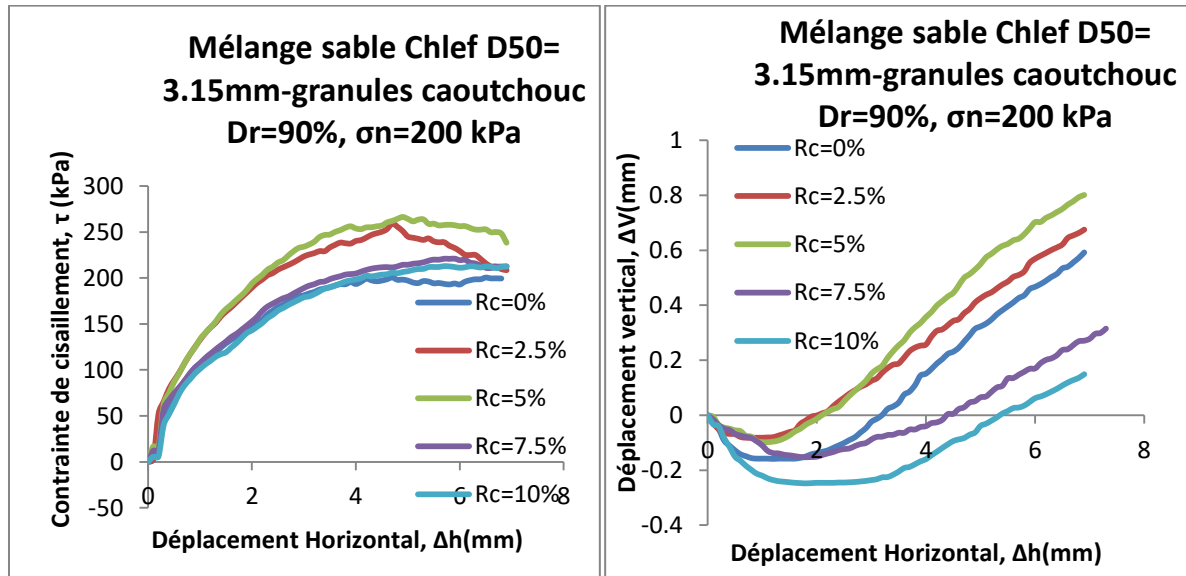


Figure 4.2 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=3.15$ mm ; $\sigma_n=200$ kPa)

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

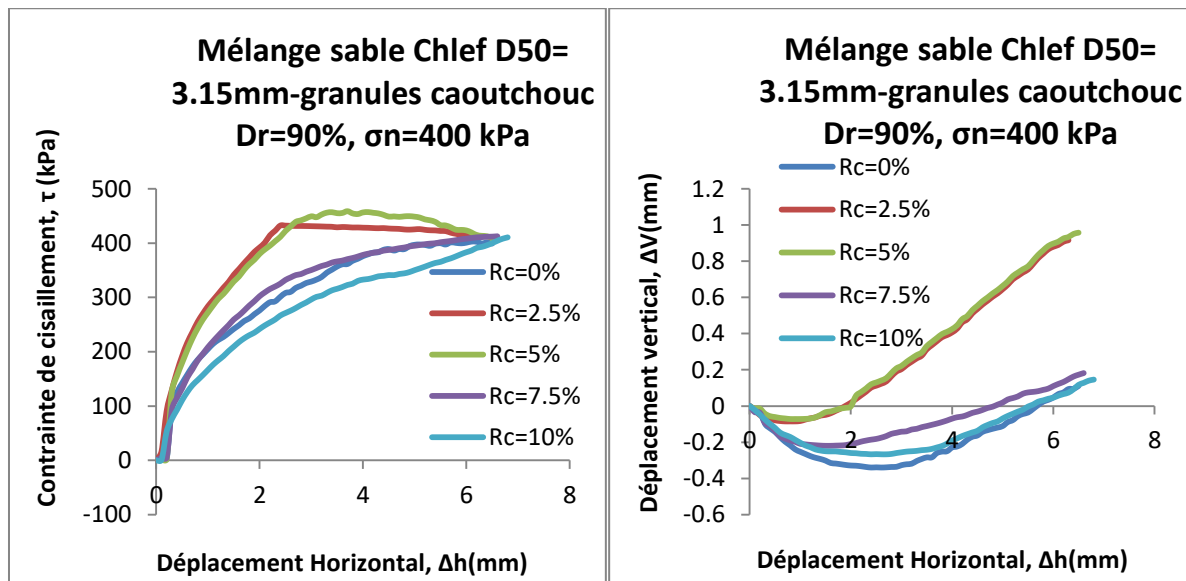


Figure 4.3 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=3.15$ mm ; $\sigma_n=400$ kPa)

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

4.2.2. Diamètre moyen ; $D_{50}=2$ mm

Les Figures 4.4, 4.5 et 4.6 indiquent l'influence de la teneur en granules de caoutchouc ($R_c=0\%$, 2,5%, 5%, 7,5% et 10%) sur le comportement mécanique de sable de Chlef ayant un diamètre moyen de 2 mm. Les échantillons ont été préparés par pluviation à sec à une densité relative de 90% et soumis à trois contraintes normales initiales de 100, 200 et 400 kPa. Les résultats de cette étude révèlent l'impact significatif de la teneur en granules de caoutchouc sur la résistance au cisaillement de cette classe granulaire. L'ajout de granules jusqu'à une teneur optimale de 5% entraîne une augmentation progressive de cette résistance par rapport au sable non renforcé, avec des gains respectifs de 7%, 18% et 5% pour trois contraintes normales (100, 200 et 400 kPa), respectivement. Cependant, au-delà de ce seuil de 5%, une tendance inverse est observée où la résistance au cisaillement diminue. Comparativement aux échantillons contenant 5% de granules, les mélanges dépassant ce seuil ($R_c=10\%$) voient leur résistance chuter de 9%, 13% et 9% pour les mêmes contraintes normales initiales ($\sigma_n=100$, 200 et 400 kPa), respectivement. Ces résultats suggèrent que l'incorporation de granules de caoutchouc jusqu'à 5% améliore la résistance de cette classe granulaire, mais que dépasser ce seuil entraîne un effet inverse et devient défavorable. Cette tendance peut s'expliquer par l'effet de perte de frottement intergranulaire. Au-delà d'une teneur en granules de 5%, ces derniers commencent à remplacer de manière prépondérante les grains de sable. Le frottement intergranulaire sable-sable, qui contribue largement à la résistance du matériau, est alors considérablement réduit au profit d'un frottement sable-granules moins efficace.

Il est clairement observé dans les Figures (4.4b, 4.5b and 4.6b) que la présence de granules de caoutchouc a une influence significative sur le comportement mécanique de sable de Chlef caractérisé par un diamètre moyen de 2mm. Les résultats obtenus confirment que la fraction de granules de caoutchouc ($R_c = 0\%$, 2,5%, 5%, 7,5% et 10%) joue un rôle important, car la phase de dilatance augmente progressivement à mesure que la fraction de granules en caoutchouc augmente à ($R_c=5\%$). En outre, une augmentation de la fraction de granules de caoutchouc au-delà de ($R_c=5\%$) entraîne une diminution de la phase de dilatance, qui est associée à une diminution de la résistance au cisaillement.

CHAPITRE 4 : EFFET DE L'INCORPORATION DE TENEUR EN GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPOSE MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES

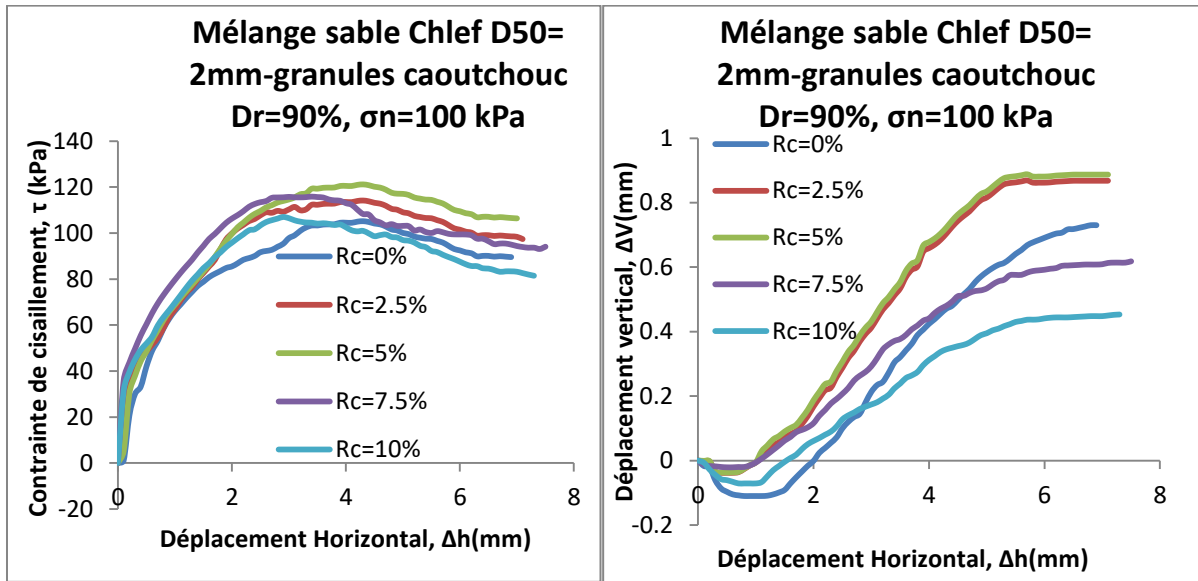


Figure 4.4 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=2$ mm ; $\sigma_n=100$ kPa)

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

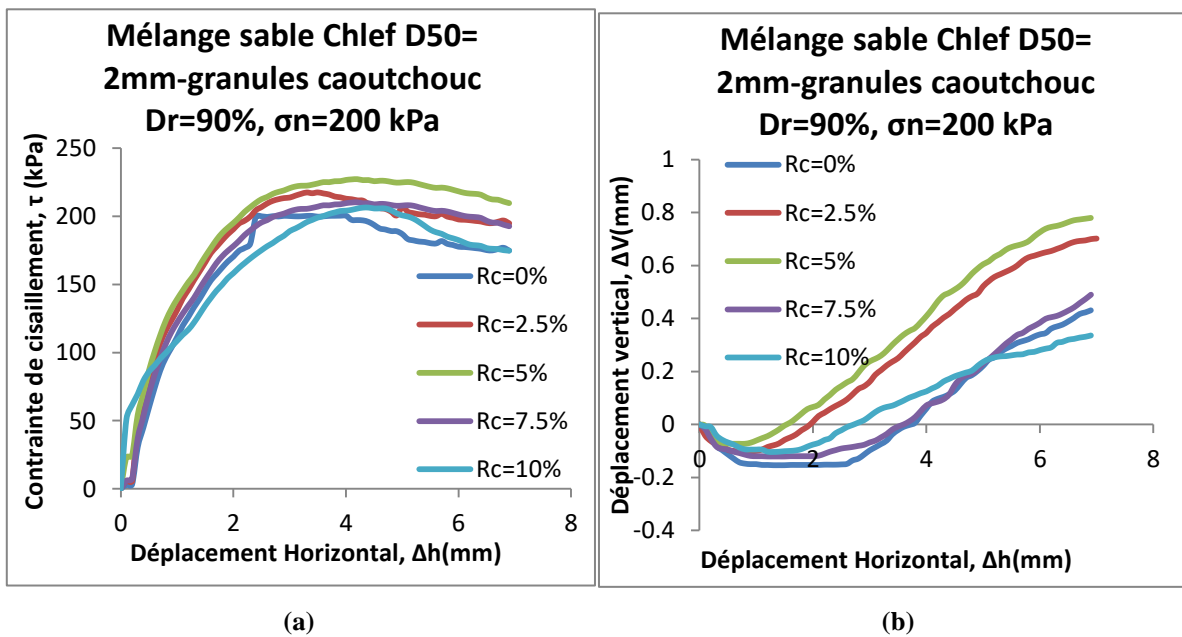


Figure 4.5 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=2$ mm ; $\sigma_n=200$ kPa)

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

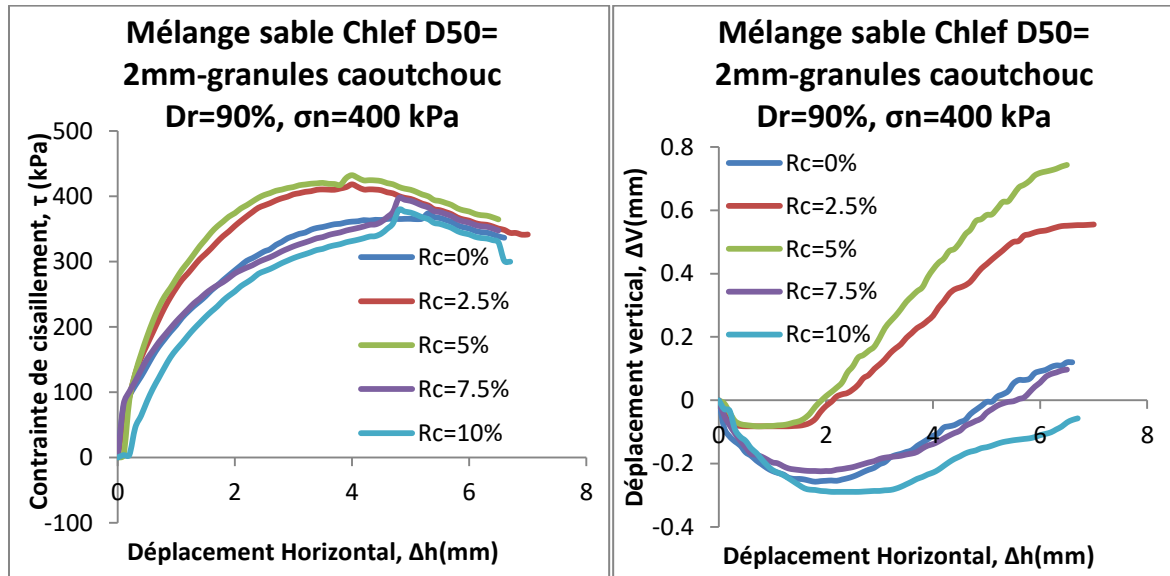


Figure 4.6 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=2$ mm ; $\sigma_n=400$ kPa)

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

4.2.3. Diamètre moyen ; $D_{50}=1$ 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 granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement de sable de Chlef caractérisé par $D_{50}=1$ mm. Les Figure 4.7, 4.8 et 4.9 présentent les résultats obtenus pour cette section. Les échantillons de mélanges de sable-granulés de caoutchouc ont été reconstitués au laboratoire par pluviation à sec avec différentes teneurs en granulés de caoutchouc de ($R_c=0\%$, 2,5%, 5%, 7,5% et 10%). Une densité relative initiale $Dr=90\%$ a été utilisée et les échantillons ont été soumis à trois contraintes normales initiales $\sigma_n=100$, 200 et 400 kPa. Les résultats indiquent que l'augmentation de la teneur en granulés en caoutchouc influence remarquablement la résistance au cisaillement pour les mélanges de sable-granulés de caoutchouc étudiés. De plus, d'après les Figures 4.7a, 4.8a et 4.9a, l'incrément de la teneur en granulés en caoutchouc induit généralement une augmentation de la résistance au cisaillement jusqu'à une teneur en granulés en caoutchouc limite de ($R_c = 5\%$) ; ($\tau_{pic}=100.75$ kPa pour $R_c=0\%$, $\tau_{pic}=109.75$ kPa pour $R_c=2.5\%$ et $\tau_{pic}=113.94$ kPa pour $R_c=5\%$), ($\tau_{pic}=191.81$ kPa pour $R_c=0\%$, $\tau_{pic}=208.81$ kPa pour $R_c=2.5\%$ et $\tau_{pic}=231.31$ kPa pour $R_c=5\%$) et ($\tau_{pic}=400.1$ kPa pour $R_c=0\%$, $\tau_{pic}=414.3$ kPa pour $R_c=2.5\%$ et $\tau_{pic}=420.56$ kPa pour $R_c=5\%$), considérant les trois contraintes normales initiales ($\sigma_n=100$, 200 et 400 kPa). Au-delà de cette teneur en granulés de caoutchouc, la tendance inverse a été observée ($R_c > 5\%$), ou l'augmentation du pourcentage de granulés de caoutchouc induit une diminution de résistance

CHAPITRE 4 : EFFET DE L'INCORPORATION DE TENEUR EN GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPOSE MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES

au cisaillement pour tous les paramètres testés ($\tau_{pic}=110.94$ kPa pour $R_c=7.5\%$, $\tau_{pic}=104.53$ kPa pour $R_c=10\%$), ($\tau_{pic}=198.5$ kPa pour $R_c=7.5\%$, $\tau_{pic}=194.75$ kPa pour $R_c=10\%$) et ($\tau_{pic}=403.6$ kPa pour $R_c=7.5\%$, $\tau_{pic}=401.14$ kPa pour $R_c=10\%$) en prenant en compte les trois mêmes contraintes normales initiales ($\sigma_n=100, 200$ et 400 kPa), respectivement.

Il est clairement démontré par la figure 4.4b, 4.5b and 4.6b que la présence de fraction de granulés de caoutchouc a une influence significative sur le comportement mécanique de cette classe granulaire. Les résultats obtenus confirment que la teneur en granulés ($R_c=0\%, 2.5\%, 5\%, 7.5\%$ et 10%) joue un rôle clé, car on observe une augmentation progressive de la phase de dilatance à mesure que cette fraction augmente jusqu'à un optimum de $R_c=5\%$. Cependant, au-delà de cette teneur seuil de 5% , l'ajout supplémentaire de granulés entraîne un effet inverse avec une diminution de la phase de dilatance, qui se traduit alors par une diminution de la résistance au cisaillement des mélanges par rapport au comportement optimal obtenu à $R_c=5\%$.

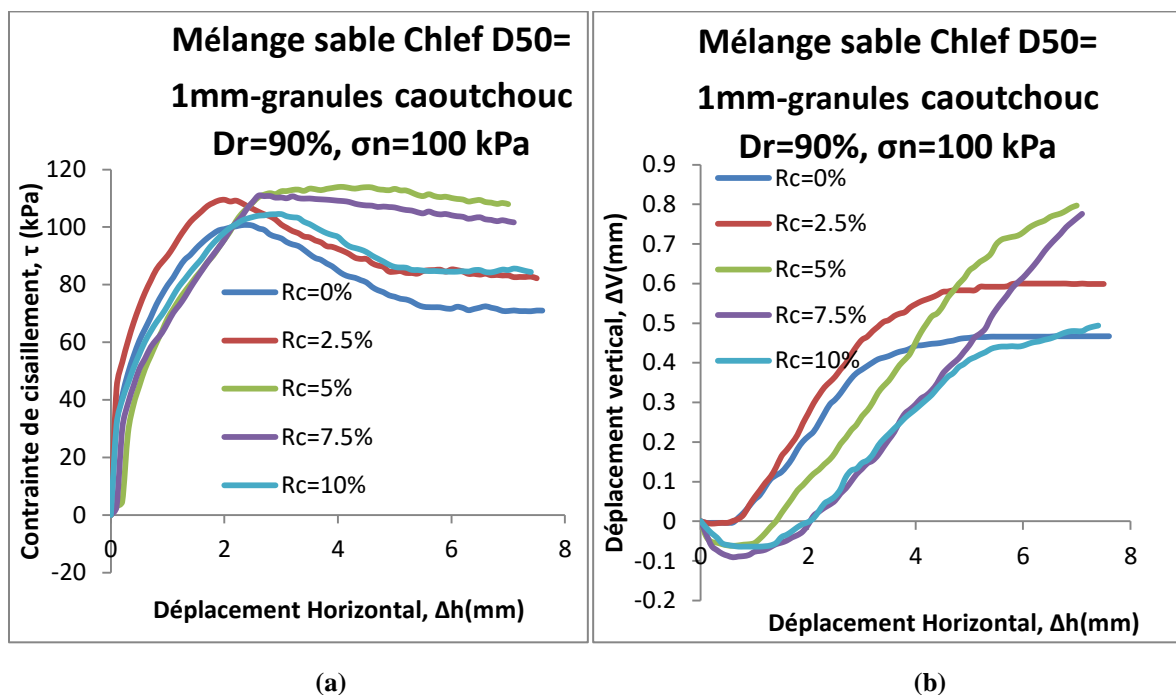


Figure 4.7 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=1$ mm ; $\sigma_n=100$ kPa)

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

CHAPITRE 4 : EFFET DE L'INCORPORATION DE TENEUR EN GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPOSE MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES

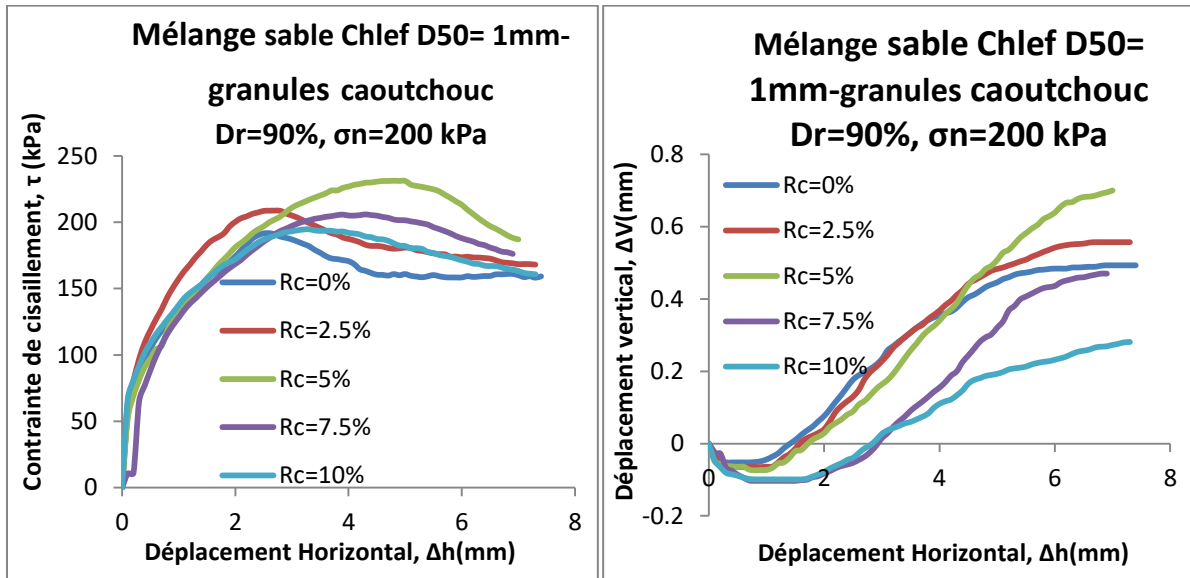


Figure 4.8 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=1$ mm ; $\sigma_n=200$ kPa)

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

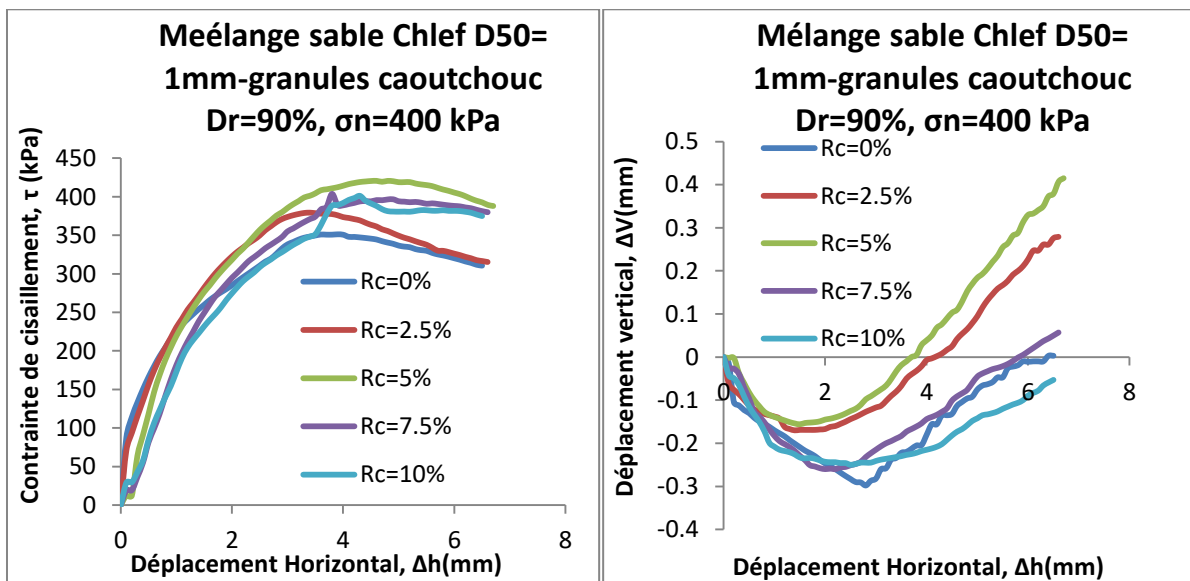


Figure 4.9 : Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique ($D_{50}=1$ mm ; $\sigma_n=400$ kPa)

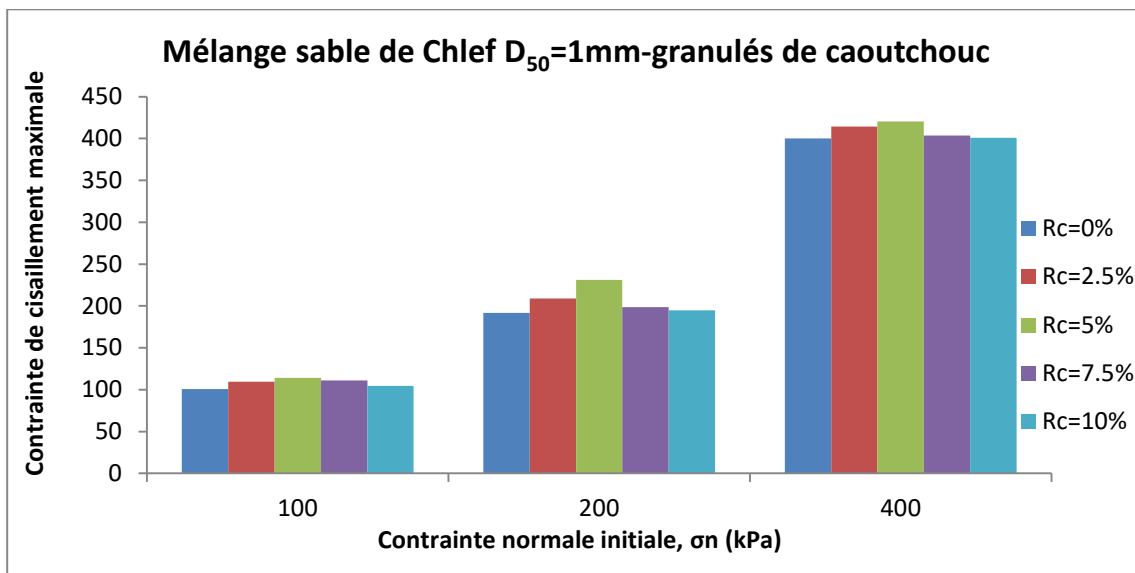
(a)-Evolution de contrainte de cisaillement (b)-Evolution de déplacement vertical

3.3. Effet de la fraction de granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement maximale

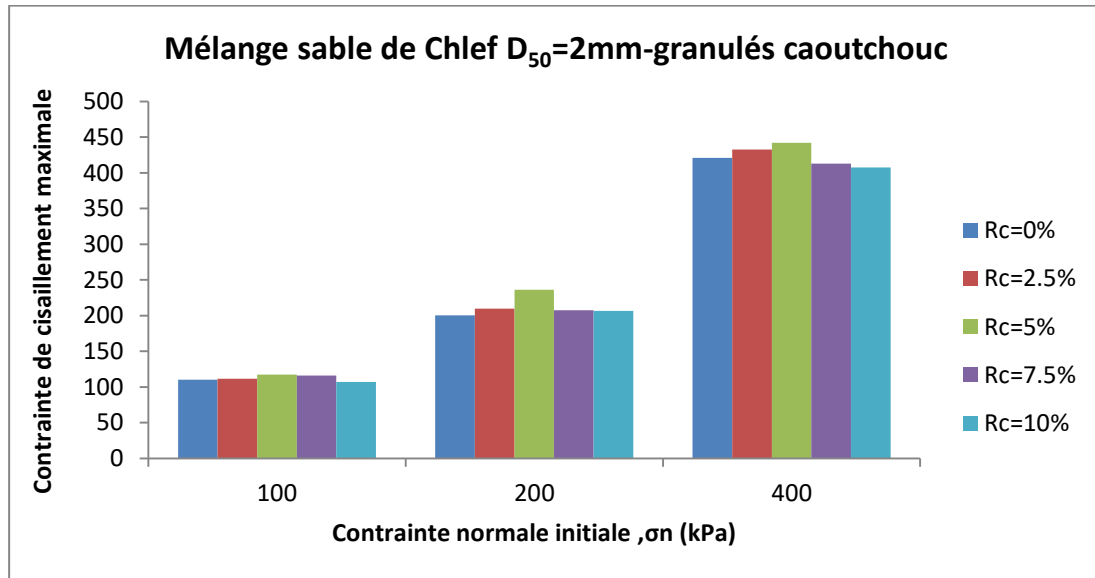
La Figure 4.10 illustre une synthèse des résultats présentés dans les Figures 4.1 à 4.9, dans le but d'évaluer l'influence de la teneur en granulés de caoutchouc (R_c variant de 0 % à 10 %)

CHAPITRE 4 : EFFET DE L'INCORPORATION DE TENEUR EN GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPOSE MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES

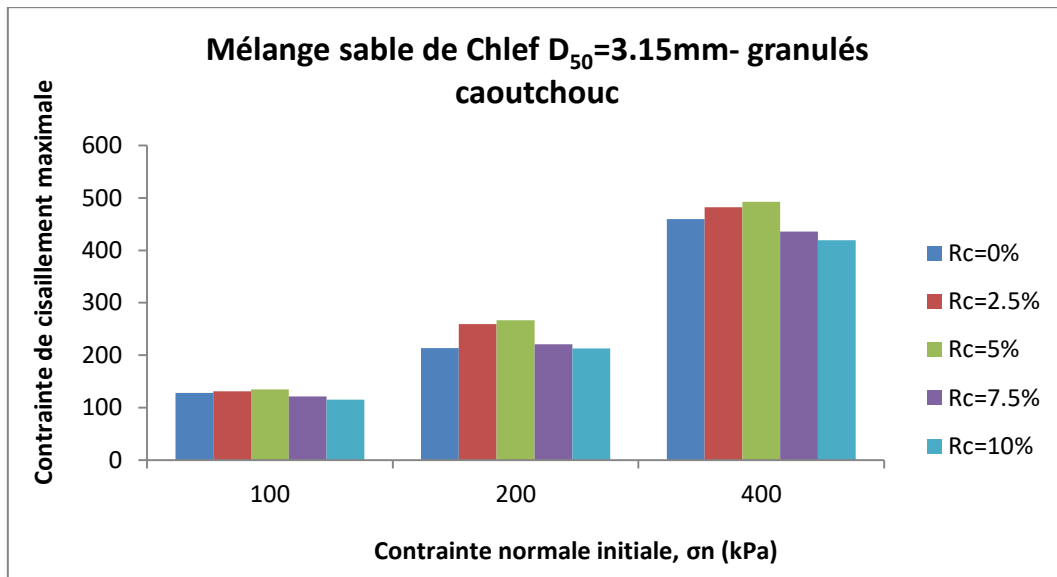
sur la résistance au cisaillement maximale des mélanges composés de trois classes granulaires de sable, caractérisées par leurs diamètres moyens respectifs ($D_{50} = 3,15$ mm, 2 mm et 1 mm). Les échantillons, préparés à une densité relative initiale de $Dr = 90$ % (état dense), ont été soumis à trois niveaux de contrainte normale (σ_n) : 100, 200 et 400 kPa. D'après l'histogramme présenté dans la Figure 4.10, il est clair que la teneur en granules de caoutchouc joue un rôle déterminant dans l'amélioration de la résistance au cisaillement pour les trois classes granulaires étudiées. En effet, la résistance au cisaillement maximale augmente avec l'augmentation de la fraction de granules de caoutchouc jusqu'à une valeur seuil de $R_c = 5$ %, quelle que soit la classe granulaire considérée et pour les trois contraintes normales initiales ($\sigma_n = 100$, 200 et 400 kPa). Au-delà de cette proportion limite, un phénomène inverse est observé : la résistance au cisaillement diminue lorsque la teneur en granules continue d'augmenter. Par ailleurs, les résultats montrent que l'effet de la teneur en granules de caoutchouc sur la résistance au cisaillement est particulièrement marqué sous une contrainte normale intermédiaire ($\sigma_n = 200$ kPa), comparé aux deux autres niveaux extrêmes ($\sigma_n = 100$ et 400 kPa). Cela indique une sensibilité différente du comportement mécanique en fonction de l'intensité de la contrainte appliquée.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.10: Résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte normale initiale (a)-Mélange sable de Chlef de D₅₀=1mm-granulés de caoutchouc, (b)- Mélange sable de D₅₀=2mm -granulés de caoutchouc, (c) Mélange sable de D₅₀=3.15mm -granulés de caoutchouc.

4.4. Effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement normalisée

Les résultats de la figure 4.11 mettent en évidence l'effet de la teneur en particules de caoutchouc sur la variation de la résistance au cisaillement normalisée (τ_{max}/σ_n) de trois types de mélanges de sable-granulés de caoutchouc ayant des diamètres moyens de 1 mm, 2 mm et 3,15 mm en utilisant des pourcentages variables de granulés de caoutchouc allant de 0 % à 10 % avec une augmentation progressive de 2,5 %. Les échantillons ont été préparés avec une

CHAPITRE 4 : EFFET DE L'INCORPORATION DE TENEUR EN GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPOSE MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES

densité relative initiale de 90 %. Les résultats ont montré que la résistance au cisaillement normalisée augmente progressivement avec l'augmentation du pourcentage de granulés de caoutchouc jusqu'à atteindre le pourcentage optimal de 5%, puis commence à diminuer après cette limite, ce qui a été clairement observé dans tous les mélanges étudiés (trois classes granulaires). Les données indiquent également que la relation entre le module de résistance et la teneur en granulés de caoutchouc peut être représentée par une fonction polynomiale, reflétant l'évolution du comportement mécanique de ces matériaux. D'autre part, il a été constaté que les mélanges de sable-granulés de caoutchouc ayant un diamètre moyen de 3,15 mm enregistreraient les valeurs les plus élevées de résistance au cisaillement normalisée par rapport aux mélanges de sable avec des diamètres moyens de 1 mm et 2 mm.

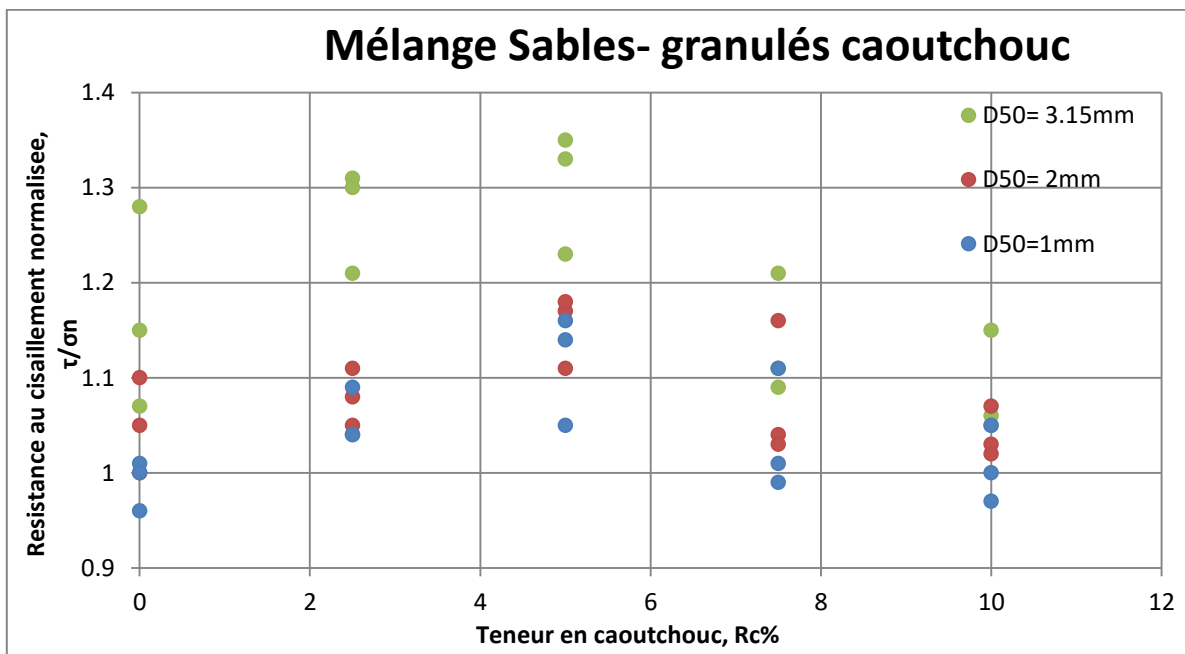


Figure 4.11: Impact de la teneur en granulés de caoutchouc sur résistance au cisaillement normalisée (τ_{\max}/σ_n) des mélanges étudiés.

4.5. Effet de la teneur en granules de caoutchouc sur l'angle de frottement

Dans le cadre de cette étude, l'impact de la fraction de granulés en caoutchouc sur l'angle de frottement interne considérant les trois diamètres moyens des grains ($D_{50}=3.15, 2$ et 1mm) a été évalué, comme illustré dans la figure 4.12. Les échantillons ont été mélangés avec des granulés de caoutchouc dans une plage de 0% à 10%, pour trois contraintes normales différentes ($\sigma_n=100, 200$ et 400 kPa), avec des incréments de 2.5%. Les mélanges de différentes classes avec granulés de caoutchouc ont été préparés avec une densité relative initiale ($Dr=90\%$). Les observations indiquent que l'augmentation de la teneur en granulés de

CHAPITRE 4 : EFFET DE L'INCORPORATION DE TENEUR EN GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPOSE MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES

caoutchouc entraîne généralement une augmentation de l'angle de frottement jusqu'à un seuil de 5% de fibres pour chaque mélange pour les trois diamètres moyens des grains. Cependant, au-delà de ces seuils, une tendance inverse a été observée pour tous les paramètres testés. En illustration, pour les échantillons reconstitués avec un diamètre moyen $D_{50}=3.15\text{mm}$, l'angle de frottement augmente de 48.04° à 49.82° , lorsque la teneur en granulés de caoutchouc augmente de 0 à 5%. Ensuite, il diminue avec l'augmentation de la teneur en granulés de caoutchouc, atteignant l'angle de frottement $\phi = 45.46^\circ$ pour $R_c=10\%$.

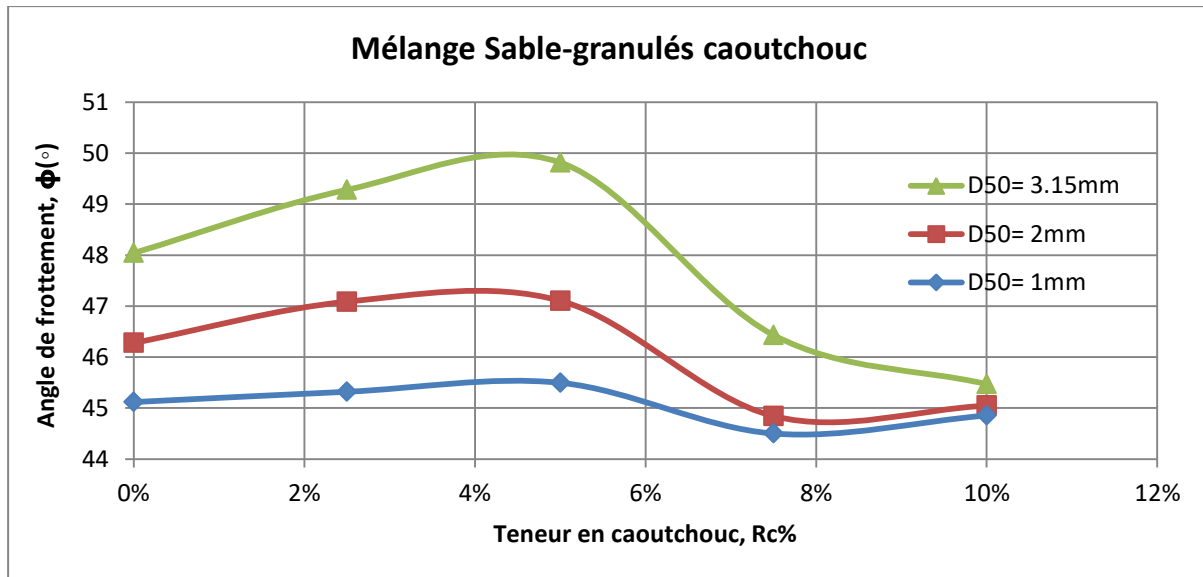


Figure 4.12 : Angle de frottement en fonction de teneur en granulés de caoutchouc pour les matériaux étudiés.

4.6. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis d'explorer l'impact de l'incorporation de granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique des échantillons de sable de Chlef reconstitués par la méthode de pluviation à sec. Trois catégories de sable de Chlef, caractérisées par leur diamètre moyen des grains ($D_{50}=3.15$, 2 et 1 mm), ont été utilisées. Des proportions de granulés de caoutchouc allant de 0% à 10% ont été ajoutées aux échantillons de différentes classes granulaires de sable, avec un intervalle de 2.5%. Les échantillons ont été soumis à trois niveaux de contraintes normales initiales ($\sigma_n=100$, 200 et 400 kPa) avec une densité initiale dense ($D_r=90\%$). Les conclusions tirées dans ce chapitre sont discutées ci-dessous.

Les résultats expérimentaux ont montré que l'ajout de granulés de caoutchouc avait un effet significatif sur le comportement mécanique des classes granulaires de sable sélectionnées, notamment en termes de résistance maximale au cisaillement, de résistance maximale au cisaillement normalisée et d'angle de frottement.

CHAPITRE 4 : EFFET DE L'INCORPORATION DE TENEUR EN GRANULES DE CAOUTCHOUC SUR LA REPOSE MECANIQUE DES SOLS GRANULAIRES

Les résultats obtenus indiquent la teneur en granulés de caoutchouc est un paramètre très pertinent dans le renforcement et l'amélioration du comportement mécanique des trois catégories de sable de Chlef, caractérisées par les trois diamètres moyens des grains. En outre, la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur en granulés de caoutchouc jusqu'à un seuil de ($R_c = 5\%$) pour les trois contraintes normales initiales considérées ($\sigma_n = 100, 200$ et 400 kPa). De plus, la tendance inverse a été obtenue lorsque la teneur en granulés de caoutchouc devenait supérieure à ce seuil pour tous les paramètres testés.

Nous pouvons conclure d'après les résultats de l'angle de frottement que ce dernier confirme les résultats de la résistance au cisaillement, où, l'augmentation de la teneur en granulés de caoutchouc induit généralement une amplification de l'angle de frottement jusqu'à une fraction de granulée de caoutchouc limite de ($R_c = 5\%$) considérant tous les paramètres sélectionnés, tandis que, la tendance inverse a été observée après de ce seuil.

Les résultats obtenus montrent que l'effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement est particulièrement prononcé lorsque la contrainte normale initiale est ($\sigma_n = 200$ kPa), par comparaison avec les échantillons soumis à des contraintes initiales plus faibles ($\sigma_n = 100$ kPa) ou plus élevées ($\sigma_n = 400$ kPa).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Des essais de cisaillement direct ont été menés afin d'évaluer l'effet de la granulométrie, représentée par le diamètre moyen des grains (D_{50}), sur le comportement mécanique de mélanges de sable de Chlef renforcés par différents taux de granulés de caoutchouc ($R_c = 0\%$, $2,5\%$, 5% , $7,5\%$ et 10%). Trois classes granulométriques distinctes ont été étudiées, correspondant à des diamètres moyens D_{50} de $3,15\text{ mm}$, 2 mm et 1 mm , tandis que les diamètres extrêmes ($D_{\max} = 4\text{ mm}$ et $D_{\min} = 0,08\text{ mm}$) ont été maintenus constants. Les mélanges ont été préparés en laboratoire avec une densité relative élevée ($Dr = 90\%$) et soumis à trois contraintes normales initiales : 100 , 200 et 400 kPa .

- Les résultats expérimentaux montrent que la granulométrie exerce une influence significative sur le comportement mécanique du sable renforcé par granulés de caoutchouc, en particulier sur la résistance maximale au cisaillement et l'angle de frottement interne. En effet, l'augmentation du diamètre moyen des grains induit une élévation notable de la résistance au cisaillement maximale, ce qui s'explique par la présence de particules plus grossières dans les échantillons à $D_{50} = 3,15\text{ mm}$, par rapport à ceux à $D_{50} = 2\text{ mm}$ et 1 mm . Ces observations sont en accord avec les travaux de Hazout et al. (2018) et Megrouse et al. (2024).
- L'analyse des déplacements verticaux et horizontaux met également en évidence que la phase de dilatance s'intensifie clairement avec l'augmentation du diamètre moyen des grains, et ce, pour l'ensemble des fractions de granulés de caoutchouc testées.
- De plus, l'angle de frottement interne croît avec le diamètre moyen des grains pour toutes les teneurs en granulés. Une relation exponentielle peut d'ailleurs être établie entre l'angle de frottement et D_{50} pour les cinq mélanges étudiés.
- Il est important de noter que l'effet du diamètre moyen sur la résistance au cisaillement est plus marqué sous une faible contrainte normale initiale ($\sigma_n = 100\text{ kPa}$), comparativement aux niveaux de contraintes plus élevés ($\sigma_n = 200$ et 400 kPa).
- Par ailleurs, cette étude a permis d'évaluer l'impact de l'incorporation de granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique des échantillons de sable reconstitués par la méthode de pluviation à sec. Trois classes granulométriques de sable de Chlef ont été utilisées ($D_{50} = 3,15\text{ mm}$, 2 mm et 1 mm), avec des proportions croissantes de granulés de caoutchouc comprises entre 0% et 10% (par paliers de $2,5\%$). Les échantillons ont été soumis aux mêmes trois niveaux de contraintes normales initiales et densité relative dense ($Dr = 90\%$).

CONCLUSION GENERALE

- Les résultats indiquent que l'ajout de granulés de caoutchouc influence significativement le comportement mécanique des mélanges, en particulier la résistance maximale au cisaillement, la résistance normalisée et l'angle de frottement interne.
- La teneur en granulés de caoutchouc apparaît comme un paramètre clé pour renforcer et améliorer le comportement mécanique des trois classes granulométriques de sable. La résistance au cisaillement augmente avec la teneur en granulés jusqu'à un seuil optimal de 5 % pour tous les niveaux de contraintes normales étudiés. Au-delà de ce seuil, une diminution progressive de la résistance est observée.
- L'analyse de l'angle de frottement confirme cette tendance : celui-ci augmente généralement avec la teneur en granulés jusqu'à une fraction limite de 5 %, avant de décroître au-delà.
- Enfin, l'effet de la teneur en granulés de caoutchouc sur la résistance au cisaillement est particulièrement prononcé sous une contrainte normale moyenne ($\sigma_n = 200$ kPa), comparé aux contraintes faibles ou élevées ($\sigma_n = 100$ et 400 kPa).

Perspectives

Étude de l'effet de la forme des particules

Explorer l'influence de la forme et de l'angularité des grains de sable et des granulés de caoutchouc sur le comportement mécanique des mélanges sable-caoutchouc, notamment la résistance au cisaillement et la dilatance.

Analyse du comportement en conditions partiellement saturées

Évaluer la performance des mélanges sable-caoutchouc sous différentes conditions de saturation, afin de mieux représenter les conditions réelles du terrain et leur impact sur la stabilité.

Couplage expérimental-numérique pour la modélisation

Développer des modèles numériques calibrés à partir d'essais expérimentaux afin de prédire le comportement mécanique des sols renforcés, en vue d'une application pratique en ingénierie géotechnique.

Référence bibliographique

- **Anvari, S. M., Shooshpasha, I., & Kutanaei, S. S. (2017).** "Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 936-944".
- **Arab, A., & Shahrour, I. (2010, October).** etude en laboratoire de l'amelioration des sols par l'augmentation de la densite relative. In SICZS_2010" Symposium International sur la Construction en Zone Sismique Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie) (pp. 26-27).
- **Andrews, S. M., Huang, J., Pérez, L. M., Isella, A., Dullemond, C. P., Kurtovic, N. T., ... & Ricci, L. (2018).** The disk substructures at high angular resolution project (DSHARP). I. Motivation, sample, calibration, and overview. *The Astrophysical Journal Letters*, 869(2), L41.
- **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.
- **Belkhatir, M., Schanz, T., Arab, A., Della, N., Kadri, A. (2014)** "Insight into the effects of gradation on the pore pressure generation of sand–silt mixtures". *Geotechnical testing journal* 37 (5), 922-931
- **Cherif Taiba, A., Mahmoudi, Y., Belkhatir, M., & Schanz, T. (2018).** Experimental investigation into the influence of roundness and sphericity on the undrained shear response of silty sand soils. *Geotechnical Testing Journal*, 41(3), 619-633.
- **Cherif Taiba, A., Mahmoudi, Y., Hazout, L., Belkhatir, M., & Schanz, T. (2017).** Experimental Research on the Influence of Grain Size Distribution on Friction Angle of Silty Sand Soils under Static Triaxial Loading. In *International Symposium on Construction Management and Civil Engineering (ISCMCE-2017) Skikda-Algeria*.
- **Dah et Vadel Cheikh (2024),** Contribution à l'étude de la forme des particules sur la caractérisation mécanique des mélanges sable-granules de caoutchouc "Mémoire de Master"
- **Finn WDL, Bransby PL, Pickering DJ (1970)** "Effect of strain history on liquefaction of sand". *J Soil Mech Found, ASCE* 96(SM6):1917–1934.
- **Ishihara K. (1985)** "Stability of natural deposits during earthquakes", *proc. 11th Int. Conf. On Soils Mechanics and foundations Eng., San Francisco, vol. 1, pp. 321-376.*

- **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.
- **Lee K.L, & Seed H.B, (1968)** "Dynamic strength of anisotropically consolidated sand", *Soils Mechanics and foundations, divisions, ASCE*, vol. 93, N° SM5, pp. 117-147.
- **Lim MS, Wijeyesekera DC, Zainorabidin A, Bakar I (2012)** "The effects of particle morphology (shape and sizes) characteristics on its engineering behaviour and sustainable engineering performance of sand". *Int J Integr Eng* 4:27–37
- **Lopera Perez, J. C., Kwok, C. Y., & Senetakis, K. (2018)**. Effect of rubber content on the unstable behaviour of sand–rubber mixtures under static loading: a micro-mechanical study. *Géotechnique*, 68(7), 561-574.
- **Mohammed Megrouse, Youcef Mahmoudi, Abdellah Cherif Taiba1, Mostefa Belkhatir (2024)** "Mechanical Properties of Sand Enhanced by Combined Polymer Stabilizer and Natural Fibers *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering v-n (2025)*".
- **Megrouse, M., Mahmoudi, Y., Cherif Taiba, A., Azaiez, H., & Belkhatir, M. (2025)**. Mechanical Properties of Sand Enhanced by Combined Polymer Stabilizer and Natural Fibers. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12(1), 12."
- **Mokhtari et Medjahdi (2021)** "Etude expérimentale de la réponse mécanique d'un mélange sable-bentonite : Influence de la taille des grains", (Mémoire master 2021).
- **Miura S, Toki S, Tatsuoka F (1994)** "Cyclic undrained triaxial behavior of sand by a cooperative test program in Japan". In: Ebelhar RJ, Drenvich VP, Kutter BL (eds) *Dynamic Geotechnical Testing II, ASTM STP*, vol 1213., pp 246–260.
- **Mahmoudi, Y., Taiba, A. C., Hazout, L., Baille, W., & Belkhatir, M. (2018)**. Influence of soil fabrics and stress state on the undrained instability of overconsolidated binary granular assemblies. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 40(2), 96-116.
- **Monkul, M. M., & Özhan, H. O. (2021)**. Microplastic contamination in soils: A review from geotechnical engineering view. *Polymers*, 13(23), 4129.
- **Sung, B. H., Wong, S. Y., Cyril, P. A., Lee, M. L., & Mohamed, A. A. (2022)**. "Effects of Crumb Rubber on the Shear Strength of Sand: An Experimental Study. *Advances in technology*, 167-182".
- **Sayao, A. S. F. J., & Vaid, Y. P. (1991)**. A critical assessment of stress nonuniformities in hollow cylinder test specimens. *Soils and Foundations*, 31(1), 60-72.

- **Tanriover, M. D., Doğanay, H. L., Akova, M., Güner, H. R., Azap, A., Akhan, S., ... & Aksu, K. (2021).** Efficacy and safety of an inactivated whole-virion SARS-CoV-2 vaccine (CoronaVac): interim results of a double-blind, randomised, placebo-controlled, phase 3 trial in Turkey. *The Lancet*, 398(10296), 213-222.
- **Xiao, Y., Long, L., Matthew Evans, T., Zhou, H., Liu, H., & Stuedlein, A. W. (2019).** Effect of particle shape on stress-dilatancy responses of medium-dense sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(2), 04018105.
- **Zhu, W., Li, M., Zhang, C., & Zhao, G. (2008).** Density and strength properties of sand-expanded polystyrene beads mixture. In *GeoCongress 2008: Characterization, Monitoring, and Modeling of GeoSystems* (pp. 36-43).