

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

Hana BAHRI

Thème

**Etude du comportement en cisaillement d'un sol
granulaire mélangé à des déchets plastiques PET**

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

Mostefa BELKHATIR	Professeur	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Président
Mehdi MISSOUM BENZIANE	MCB	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Examinateur
Abdelhamid FLITTI	MCA	Université Hassiba Benbouali de Chlef	Encadrant

Promotion : 2024/2025

Remerciement

Louange à Dieu, en premier et en dernier, visible et invisible,
qui m'a accordé la force, la patience et la clarté d'esprit pour mener à bien ce travail avec
persévérance.

Je tiens avant tout à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, Monsieur le Docteur
Abdelhamid Flitti,

pour sa patience, sa bienveillance et la richesse de ses conseils. Il a su me guider avec rigueur
et générosité, et je lui suis profondément reconnaissante pour son accompagnement constant,
malgré les difficultés rencontrées. Son soutien m'a été précieux à chaque étape de ce
parcours.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury,
pour avoir aimablement accepté d'examiner ce travail, ainsi que pour les remarques et les
orientations qu'ils ne manqueront pas d'y apporter, et qui contribueront sans aucun doute à
enrichir ce projet scientifique.

Je tiens à adresser une reconnaissance particulière à Monsieur Houcine, responsable du
laboratoire de MDS du pôle de Hay Essalem, grâce à qui mes essais à l'appareil de
cisaillement se sont déroulés dans les meilleures conditions.

Un merci tout particulier va à ma chère **mère,**
mon pilier, mon refuge, ma source d'amour inépuisable. C'est grâce à sa foi inébranlable en
moi, à ses prières silencieuses, à ses sacrifices quotidiens et à sa force intérieure que j'ai
trouvé le courage d'aller jusqu'au bout. Ce mémoire est autant le sien que le mien.

Je n'oublie pas de remercier ma famille, pour leur soutien affectueux et leur présence
constante à mes côtés, même dans les moments les plus incertains.

Enfin, j'exprime toute ma reconnaissance à mes amies et camarades, pour les instants de
partage, d'encouragement et de solidarité. Leur présence a allégé bien des journées longues et
parfois éprouvantes.

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit de persévérance et d'espoir, à ceux dont les prières silencieuses ont porté mes pas, à ceux qui ont veillé sur moi, supporté mes doutes, et m'ont accompagné avec amour à chaque étape...

À ma mère bien-aimée :

source infinie de tendresse et de force, je te dois ce parcours. Ce travail est aussi le tien.

À mon père :

qui m'a appris la patience, le courage, et le sens du devoir sans jamais attendre en retour...

Je t'offre cette réussite avec tout mon respect et ma gratitude.

À mes très chères sœurs (**Nesrine et Manel**),

compagnons de vie et de cœur, merci pour votre présence rassurante et votre affection constante.

Mon cher frère (**Abdel hadi**),

frère de sang et de cœur

À mon cher neveu **Ghaith**, le petit trésor de la famille

À mes amies les plus chères, toujours présentes (**Nour el houda et Hana**)

merci pour chaque sourire, chaque mot d'encouragement, et pour avoir rendu ce chemin plus doux et moins solitaire.

À mon beau-frère (Yasser)

Et enfin,

à tous ceux qui ont parié sur mon échec, merci... car vous avez été, sans le vouloir, une source de motivation supplémentaire. Vous m'avez poussé à persévérer, à me dépasser,

et à prouver que la volonté sincère triomphe de tous les doutes.

RESUME

Ces dernières années, l'étude de la possibilité d'utiliser des déchets ménagers, en particulier des déchets plastiques, dans les processus d'amélioration des sols a suscité une attention croissante. Bien que les résultats publiés soient très encourageants, ils ne sont pas tous cohérents car les tendances varient en fonction du type de sol et de la structure du plastique. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le comportement au cisaillement d'un sol sableux mélangé à différents pourcentages de déchets plastiques en polyéthylène téréphtalate (PET). Les résultats montrent qu'une teneur de 1,5% de bandes plastiques est la valeur optimale qui peut être ajoutée au sable pour améliorer légèrement son comportement au cisaillement à l'état dense, que le mélange soit préparé par la méthode sèche ou humide. De plus, à une teneur en déchets constante de 1,5 %, il s'avère que les bandes plastiques améliorent le comportement au cisaillement du sable mieux que les paillettes de plastique de forme carrée, bien que l'amélioration soit quelque peu faible.

Mots clés : Sable, déchets, plastique, PET, résistance au cisaillement.

ABSTRACT

In recent years, the study of the possibility of using household waste, in particular plastic waste, in soil improvement processes has aroused increasing attention. Although the published results are very encouraging, they are not all consistent because the trends vary depending on the type of soil and the structure of the plastic. The main objective of this study is to assess the shear behaviour of a sandy soil mixed with different percentages of polyethylene terephthalate (PET) plastic waste. The results show that a 1.5% content of plastic strips is the optimal value that can be added to sand to slightly improve its shear behaviour in the dense state, whether the mixture is prepared using the dry or wet method. Moreover, at a constant waste content of 1.5%, it turns out that plastic strips improve the shear behaviour of sand better than square-shaped plastic flakes, although the improvement is somewhat small.

Keywords: Sand, waste, plastic, PET, shear strength.

ملخص

في السنوات الأخيرة، حظيت دراسة إمكانية استخدام النفايات المنزلية، وخاصة النفايات البلاستيكية، في عمليات تحسين التربة باهتمام متزايد. على الرغم من أن النتائج المنشورة مشجعة للغاية، إلا أنها ليست كلها متسقة، حيث أنها تختلف حسب نوع التربة وهيكل البلاستيك. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقييم سلوك القص للتربة الرملية الممزوجة بنسب مختلفة من نفايات البلاستيك المصنوعة من مادة البولي إيثيلين تيريفثاللات. تظهر النتائج أن نسبة 1.5% من شرائح البلاستيك هي القيمة المثلى التي يمكن إضافتها إلى الرمل لتحسين سلوكه أثناء القص بشكل طفيف في الحالة الكثيفة، سواء تم تحضير الخليط بالطريقة الجافة أو الرطبة. علاوة على ذلك، عند نسبة نفايات ثابتة تبلغ 1.5%، اتضح أن الشرائح البلاستيكية تعمل على تحسين سلوك القص للرمال بشكل أفضل من الرقائق البلاستيكية ذات الشكل المربع، على الرغم من أن التحسن صغير إلى حد ما.

الكلمات المفتاحية: رمل، نفايات، بلاستيك، البولي إيثيلين تيريفثاللات، قوة القص.

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
------------------------------------	---

Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.1 Introduction.....	4
1.2 Classification des déchets	6
1.3 Composition moyenne des déchets ménagers et assimilés en Algérie	7
1.4 Déchets plastiques.....	8
1.4.1 Aperçu des différentes catégories de plastique à usage unique en Algérie	9
A. Le polyéthylène téréphtalate	9
B. Les polyéthylènes.....	10
C. Le polypropylène.....	10
D. Le polystyrène (PS).....	10
1.5 Efficacité de l'utilisation des déchets plastiques pour l'amélioration des sols.	11
1.6 Conclusion	13

Chapitre 2 : Dispositif expérimental et mode opératoire

2.1 Introduction.....	16
2.2 Matériaux utilisés.....	16
2.2.1 sable de Chlef.....	16
2.2.2 Déchets plastique PET	17
2.3 Dispositif expérimental	18
2.4 Mode opératoire	20
2.4.1 Préparation de l'échantillon	20
2.4.2 Consolidation et cisaillement de l'échantillon	22
2.4.3 Traitement des résultats	22
2.5 Conclusion	24

Chapitre 3 : Effet de la teneur en déchets plastiques PET sur le comportement au cisaillement d'un sol sableux

3.1 Introduction.....	26
3.2 Effet de la teneur en déchets plastique PET.....	26
3.2.1 Etat sec ($w = 0\%$).....	26
A. Bandes plastiques PET.....	26
B. Paillettes en plastique PET de forme carrée.....	30
3.2.2 Etat humide ($w = 5\%$).....	32
3.3 Conclusion	35

Chapitre 4 : Influence de certains autres paramètres sur le comportement au cisaillement du mélange sable-plastique

4.1 Introduction.....	38
4.2 Effet de la forme des déchets plastiques	38
4.3 Effet de la densité relative initiale	40
4.4 Effet de la méthode de préparation des échantillons	42
4.5 Conclusion	45
Conclusion Générale.....	46
Références Bibliographiques.....	47

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Etude bibliographique

- Figure 1.1** : Composition moyenne des déchets ménagers et assimilés en Algérie entre avril 2018 et mars 2019 ([Agence nationale des déchets, 2019](#)) 8
- Figure 1.2** : Composition des déchets plastiques par sous-catégories ([Agence nationale des déchets, 2019](#)) 9
- Figure 1.3** : Enveloppes de rupture de Mohr-Coulomb modifiées à différents pourcentages de déchets plastiques : (a) sol rouge (b) sable ([Babu et Chouksey, 2011](#))..... 12
- Figure 1.4** : Résultats d'essais de résistance à la compression non confinée réalisés sur un sol argileux mélangé à des déchets plastiques PET et PP. ([Hassan et al., 2021](#)) 13

Chapitre 2 : Dispositif expérimental et mode opératoire

- Figure 2.1** : Sable naturel de Chlef..... 16
- Figure 2.2** : Courbe granulométrique du sable de Chlef 17
- Figure 2.3** : Bouteille d'eau en PET prête à être découpée 18
- Figure 2.4** : Déchets de plastiques PET utilisées 18
- Figure 2.5** : Appareil de cisaillement direct utilisé (laboratoire de mécanique des sols de l'université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie)..... 19
- Figure 2.6** : Boîte de cisaillement 20
- Figure 2.7** : Mélange composé de sable et de déchets plastiques (PET) : (a) mélange sec ; (b) mélange humide..... 21
- Figure 2.8** : Échantillon prêt à tester 22
- Figure 2.9** : Résultats typiques d'un essai de cisaillement direct sur un sol sableux : (a) contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal (τ - δh) ; (b) déformation verticale en fonction du déplacement horizontal (δv - δh) (d'après [NF P94-071-1](#)). 23

Figure 2.10: Détermination des paramètres de résistance au cisaillement, C et ϕ , critère de rupture au pic (d'après NF P94-071-1).	24
---	----

Chapitre 3 : Effet de la teneur en déchets plastiques PET sur le comportement au cisaillement d'un sol sableux

Figure 3.1: Evolution de la contrainte de cisaillement (τ) des mélanges sable-bandes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), $D_r = 80\%$, $w = 0\%$	27
--	----

Figure 3.2: Evolution de la contrainte de cisaillement (τ) des mélanges sable-bandes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), $D_r = 50\%$, $w = 0\%$	27
--	----

Figure 3.3 : Rapport de contrainte de cisaillement maximale en fonction de la teneur en bandes plastiques, $w = 0\%$: (a) $D_r = 80\%$; (b) $D_r = 50\%$	28
---	----

Figure 3.4 : Variation du déplacement vertical (δv) des mélanges sable-bandes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), $D_r = 80\%$, $w = 0\%$	29
--	----

Figure 3.5 : Variation du déplacement vertical (δv) des mélanges sable-bandes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), bandes plastiques, $D_r = 50\%$, $w = 0\%$	29
---	----

Figure 3.6 : Effet de la teneur en bandes plastiques (PSc) sur les paramètres de résistance au cisaillement du sable, $w = 0\%$: (a) $D_r = 80\%$; (b) $D_r = 50\%$	30
--	----

Figure 3.7 : Rapport de contrainte de cisaillement maximale en fonction de la teneur en paillettes de plastique, $D_r = 80\%$, $w = 0\%$	31
--	----

Figure 3.8 : Variation du déplacement vertical (δv) des mélanges sable-paillettes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), $D_r = 80\%$, $w = 0\%$	31
--	----

Figure 3.9 : Effet de la teneur en paillettes de plastique carrés sur les paramètres de résistance au cisaillement du sable, $w = 0\%$, $D_r = 80\%$	32
--	----

Figure 3.10 : Evolution de la contrainte de cisaillement (τ) des mélanges sable-bandes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), $D_r = 80\%$, $w = 5\%$	33
--	----

Figure 3.11 : Contrainte de cisaillement maximale, τ_{max} (kPa) en fonction de la teneur en	34
--	----

bandes plastiques, $D_r = 80\%$, $w = 5\%$

Figure 3.12 : Variation du déplacement vertical (δv) des mélanges sable-bandes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), bandes plastiques, $D_r = 80\%$, $w = 5\%$ 34

Figure 3.13: Effet de la teneur en bandes plastiques sur les paramètres de résistance au cisaillement du sable, $D_r = 80\%$, $w = 5\%$ 35

Chapitre 4 : Influence de certains autres paramètres sur le comportement au cisaillement du mélange sable-plastique

Figure 4.1 : Taux d'amélioration de la contrainte de cisaillement maximale du sable lorsque 1,5 % de plastique y est ajouté, $D_r = 80\%$; $w = 0\%$ 38

Figure 4.2 : Variation du déplacement vertical (δv) en fonction du déplacement horizontal (δh), $P_{Sc} = 0$ et 1.5%, $D_r = 80\%$, $w = 0\%$: (a) $\sigma_N = 100$ kPa ; (b) $\sigma_N = 200$ kPa 39

Figure 4.3 : Effet de la forme des fragments de plastique sur les paramètres de résistance au cisaillement du sable mélangé à 1.5 % de déchets plastiques, $D_r = 80\%$, $w = 0\%$ 39

Figure 4.4 : Evolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du déplacement horizontal (δh), $w = 0\%$, $P_{Sc} = 1.5\%$:(a) $\sigma_N = 100$ kPa ; (b) $\sigma_N = 200$ kPa..... 40

Figure 4.5 : Variation du déplacement vertical (δv) en fonction du déplacement horizontal (δh), $w = 0\%$, $P_{Sc} = 1.5\%$: (a) $\sigma_N = 100$ kPa ; (b) $\sigma_N = 200$ kPa..... 41

Figure 4.6 : Effet de la densité relative initiale (D_r) sur les paramètres de résistance au cisaillement du sable contenant 1,5 % de bandes plastiques..... 41

Figure 4.7 : Evolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du déplacement horizontal (δh), $P_{Sc} = 0\%$, $D_r = 70 - 80\%$: (a) $\sigma_N = 200$ kPa ; (c) $\sigma_N = 300$ kPa..... 42

Figure 4.8 : Evolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du déplacement horizontal (δh), $P_{Sc} = 1.5\%$, $D_r = 70 - 80\%$: (a) $\sigma_N = 200$ kPa ; (c) $\sigma_N = 300$ kPa..... 43

Figure 4.9 : Variation du déplacement vertical (δv) en fonction du déplacement horizontal (δh), $P_{Sc} = 0\%$, $D_r = 70 - 80\%$: (a) $\sigma_N = 200$ kPa ; (b) $\sigma_N = 300$ kPa 44

Figure 4.10 : Variation du déplacement vertical (δ_v) en fonction du déplacement horizontal (δ_h), PSc = 1.5 %, Dr = 70 – 80 % : (a) $\sigma_N = 200$ kPa ; (b) $\sigma_N = 300$ kPa..... 44

Figure 4.11 : Effet de la méthode de préparation des échantillons sur les paramètres de résistance au cisaillement, PSc = 0% et 1.5%, Dr = 70 – 80 % : (a) C vs w ; (b) ϕ vs w 45

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Tableau 1.1 : Classification des méthodes d'amélioration des sols adoptées par le TC17 (d'après Chu et al., 2009).....	5
Tableau 1.2 : Types de déchets et méthodes de traitement selon les normes de l'Union européenne (Ustohalova, 2011).....	7

Chapitre 2 : Dispositif expérimental et mode opératoire

Tableau 2.1 : Caractéristiques physiques du sable de Chlef étudié	17
--	----

NOTATIONS

A (cm²)	Surface corrigée de la section cisailée
C (kPa)	Cohésion
Cc (.)	Coefficient de Courbure, $Cc = (D30)^2 / (D10 \cdot D60)$
Cu (.)	Coefficient d'uniformité, $Cu = D60/D10$
D₁₀ (mm)	Diamètre effectif des grains (Diamètre des grains correspondant à 10% de passant)
D₃₀ (mm)	Diamètre des grains correspondant à 30% de passant
D₅₀ (mm)	Diamètre moyen (Diamètre des grains correspondant à 50% de passant)
D₆₀ (mm)	Diamètre des grains correspondant à 60% de passant
Dr (%)	Densité relative
e (.)	Indice des vides
e_{max} (.)	Indice des vides maximal
e_{min} (.)	Indice des vides minimal
G_s (g/cm³)	Masse spécifique / masse volumique des graines solides
Id (.)	Indice de densité relative
M_D (g)	Masse de déchets plastiques
M_s (g)	Masse sèche du sable
M_w (g)	Masse d'eau
Pc (%)	Teneur en déchets plastiques
PET	Polyéthylène téréphtalate
PFc (%)	Teneur en paillettes de plastiques
PSc (%)	Teneur en bandes de plastiques
V_T (cm³)	Volume total
γ_s (kN/m³)	Poids volumique des grains solides

δh (mm)	Déplacement horizontal
δv (mm)	Déplacement vertical
ρ_s (g/cm³)	Masse volumique des grains solides
σ_N (kPa)	Contrainte normale
τ (kPa)	Contrainte de cisaillement
τ_{\max} (kPa)	Contrainte de cisaillement maximale
$\tau_{\max}/\tau_{\max 0\%}$	Rapport de contrainte de cisaillement maximale
Φ (°)	Angle de frottement

INTRODUCTION GENERALE

Lors de la mise en œuvre de projets de génie civil, les ingénieurs rencontrent souvent des sols impropres à la construction, tels que ceux présentant une compressibilité élevée, une faible cohésion ou une faible résistance au cisaillement. L'amélioration des propriétés mécaniques de ces sols est un enjeu crucial en géotechnique, car elle affecte directement la stabilité des structures, la sécurité des infrastructures et leur durabilité à long terme.

L'utilisation des déchets solides issus de la consommation humaine, en constante augmentation, dans le processus d'amélioration des sols est l'une des méthodes les plus répandues ces dernières années. La valorisation de ces déchets, qu'ils soient ménagers ou de construction et de démolition, dans des applications géotechniques constitue une solution supplémentaire incontournable pour contribuer à leur élimination et réduire leur impact sur l'environnement.

Considérant que les déchets plastiques constituent une part importante des déchets ménagers, tant à l'échelle mondiale que locale, ils ont fait et continuent de faire l'objet de recherches croissantes visant à étudier leur potentiel d'utilisation dans l'amélioration des sols. Les premiers résultats sont positifs, mais ils ne sont pas tous cohérents, car la teneur et la forme optimales des déchets plastiques varient en fonction du type de sol et de la structure du plastique.

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier le comportement au cisaillement d'un sol sableux mélangé à des déchets plastiques en polyéthylène téréphtalate (PET).

Le présent travail comprend quatre chapitres :

Le premier chapitre présente des statistiques générales sur les déchets ménagers, y compris les déchets plastiques, générés en Algérie, ainsi qu'un résumé des résultats de certaines recherches antérieures qui ont étudié le comportement mécanique des sols mélangés à des déchets plastiques.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des caractéristiques physiques des matériaux testés, du matériel utilisé et du mode opératoire suivi pour réaliser la partie expérimentale de cette étude.

Le troisième chapitre se concentre sur la présentation et l'analyse des résultats d'essais de cisaillement direct réalisés sur des mélanges composés de sable et de déchets plastiques PET, en mettant l'accent sur l'effet de la teneur en déchets.

Le quatrième chapitre met en évidence l'effet de la forme des déchets plastiques, de la densité relative et de la méthode de préparation des échantillons sur le comportement au cisaillement du mélange de sable et de déchets plastiques PET.

Chapitre 1

Etude bibliographique

1.1 Introduction

La communauté a constamment besoin de nouvelles installations techniques, d'infrastructures et de complexes résidentiels pour faciliter la vie quotidienne et suivre le rythme de la récente augmentation significative de la densité de population.

Face à la rareté des terrains naturellement propices à la construction de grands ouvrages, il est devenu impératif de recourir à des techniques d'amélioration des sols existants, souvent caractérisés par de mauvaises propriétés mécaniques.

L'amélioration du sol fait généralement référence à la modification des propriétés physiques du sol sous un site, à une profondeur suffisante pour permettre une construction permanente ou temporaire efficace, économique et sûre dans un délai raisonnable. Les objectifs d'amélioration typiques seraient l'un ou une combinaison des éléments suivants (Bell et Kirsch, 2012) :

- Augmentation de la densité ou de la résistance au cisaillement pour améliorer la portance ou pour fournir un support suffisant pour les excavations ou les tunnels.
- Diminution de la compressibilité afin de réduire au minimum les tassements totaux ou différentiels des édifices ou des structures, ou autres déformations du sol résultant d'excavations ou de creusements de tunnels.
- Minimiser l'écoulement des eaux souterraines en réduisant la perméabilité pour éviter les inondations ou les dégâts des eaux ou pour isoler les zones d'eaux souterraines contaminées.
- A l'inverse, une amélioration du drainage profond afin d'assister les techniques de précharge ou de surcharge.
- Prévention de la liquéfaction ou réduction de la propagation latérale sous ou à proximité des structures nouvelles et existantes lors des tremblements de terre, par densification, remplacement par des matériaux plus résistants ou drainage en profondeur.

Les méthodes nombreuses et variées d'amélioration des sols actuellement disponibles ont été classées de différentes manières. En fonction de la tendance générale du comportement du sol à améliorer et de l'utilisation ou non d'adjuvants, le TC17 (Comité technique 17) classe les méthodes d'amélioration en cinq catégories principales, comme indiqué dans le tableau 1 (d'après Chu et al., 2009).

Tableau 1.1 : Classification des méthodes d'amélioration des sols adoptées par le TC17 (d'après [Chu et al. 2009](#)).

Catégorie	Méthodes
Amélioration des sols sans adjuvants dans les sols non cohésifs ou les matériaux de remblai.	Compactage dynamique ; Vibrocompactage ; Compactage par explosion ; Compactage par impulsion électrique ; Compactage de surface (y compris le compactage par impact rapide).
Amélioration des sols sans adjuvants dans les sols cohésifs.	Remplacement/déplacement (y compris la réduction de charge par l'utilisation de matériaux légers) ; Préchargement par remblai (y compris l'utilisation de drains verticaux) ; Préchargement par dépression (y compris les techniques combinant remblai et dépression) ; Consolidation dynamique avec drainage amélioré (y compris l'utilisation de dépression) ; Consolidation par électro-osmose ou électrocinétique ; Stabilisation thermique par chauffage ou congélation ; Compactage par hydro-explosion.
Amélioration du sol avec des adjuvants ou des inclusions.	Vibro-remplacement ou colonnes ballastées ; Remplacement dynamique ; Pieux de compactage en sable ; Colonnes confinées par géotextile ; Inclusions rigides (ou fondation composite) ; Remblai sur colonnes ou pieux renforcé par géosynthétiques ; Méthodes microbiologiques ; Autres méthodes.
Amélioration du sol avec des adjuvants injectés " grouting ".	Injection de coulis particulaire ; Injection de coulis chimique ; Méthodes de mélange (y compris le prémélange ou le mélange en profondeur) ; Jet grouting (ou injection par jet haute pression) ; Injection de compactage ; Injection de compensation.
Renforcement des sols.	Géosynthétiques ou terres stabilisées mécaniquement ; Ancrages de sol ou clous de sol ; Méthodes biologiques utilisant la végétation.

Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients et celle qui convient le mieux à l'amélioration du sol est choisie en fonction de divers paramètres tels que le type et les propriétés du sol, la superficie et la profondeur ciblées, le coût, les facteurs environnementaux, l'applicabilité, la disponibilité sur le marché, la technologie requise pour la mise en œuvre et l'efficacité dans l'amélioration des propriétés techniques du sol, etc (Chmielewska et Gosk, 2022).

Récemment, l'étude de la possibilité d'utiliser divers types de déchets comme additifs pour améliorer les sols suscite un intérêt accru. L'objectif commun de ces études est de trouver des matériaux alternatifs à ceux utilisés dans les processus d'amélioration des sols et de contribuer à réduire l'impact des déchets accumulés sur l'environnement grâce au recyclage et à la réutilisation.

Au niveau européen, le déchet est défini comme toute substance ou tout objet dont le détenteur se débarrasse ou dont il envisage ou se doit de se débarrasser. Dans ce contexte, le déchet possède un statut légal particulier visant à prévenir les dangers pour l'environnement et la santé publique associés à son abandon. Le statut de déchet impose une série de mesures indispensables pour assurer la gestion appropriée des déchets, ce qui inclut leur collecte, transport, valorisation et élimination tout en respectant la santé humaine et l'environnement (Ministère français de l'aménagement du territoire et de la décentralisation, 2024).

1.2 Classification des déchets

Il existe une large gamme de déchets qui peuvent être valorisés et utilisés, ce qui leur confère une valeur économique et les rend aptes à la commercialisation. Les déchets peuvent être classés en fonction de divers paramètres tels que leurs caractéristiques, leur producteur et la zone où ils sont générés.

Le système de gestion des déchets de l'Union européenne présente un bon exemple de classification des déchets. Cette définition permet de développer des tendances durables dans les pratiques de gestion des déchets applicables à l'échelle mondiale. Les déchets, en fonction de leur origine, sont répertoriés dans le tableau 1.2. La mise en décharge est considérée comme le dernier recours et ne doit être utilisée que lorsque toutes les autres options ont été épuisées (Ustohalova, 2011).

Tableau 1.2 : Types de déchets et méthodes de traitement selon les normes de l'Union européenne (Ustohalova, 2011).

Types de déchets
Déchets municipaux (ménagers et commerciaux)
Déchets industriels (y compris manufacturiers)
Déchets dangereux
Déchets de construction et de démolition
Déchets miniers
Déchets d'équipements électriques et électroniques
Déchets d'emballage
Véhicules et pneus hors d'usage
Déchets agricoles
Déchets municipaux biodégradables

1.3 Composition moyenne des déchets ménagers et assimilés en Algérie

Conformément à la loi-cadre 01-19, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, les déchets ménagers et assimilés (DMA) sont définis comme l'ensemble des déchets provenant des ménages ainsi que des déchets assimilés résultant d'activités industrielles, commerciales, artisanales et autres qui sont de nature et de composition analogues aux déchets ménagers (Agence nationale des déchets, 2020a).

En Algérie, les déchets ménagers et assimilés (DMA) constituent la plus grande part des déchets solides générés. En 2018, leur quantité était estimée à plus de 13,1 millions de tonnes. Ce chiffre est basé sur une population estimée à 42,2 millions d'habitants en 2018 et un taux moyen de production de déchets de 0,8 kilogramme par habitant et par jour. Au cours de la dernière décennie, l'augmentation quantitative et qualitative des DMA s'est accentuée, amplifiant ainsi les menaces sur la santé publique et l'environnement. Cette situation devient particulièrement alarmante lorsque le niveau de traitement et de valorisation des déchets reste

relativement faible. Les travaux effectués dans quatre wilayas pilotes (Jijel, Constantine, M'Sila et Ouargla) entre avril 2018 et mars 2019 ont permis d'avoir un aperçu de la composition moyenne des déchets ménagers et assimilés au niveau national, comme le montre la figure 1 ([Agence nationale des déchets, 2019](#)).

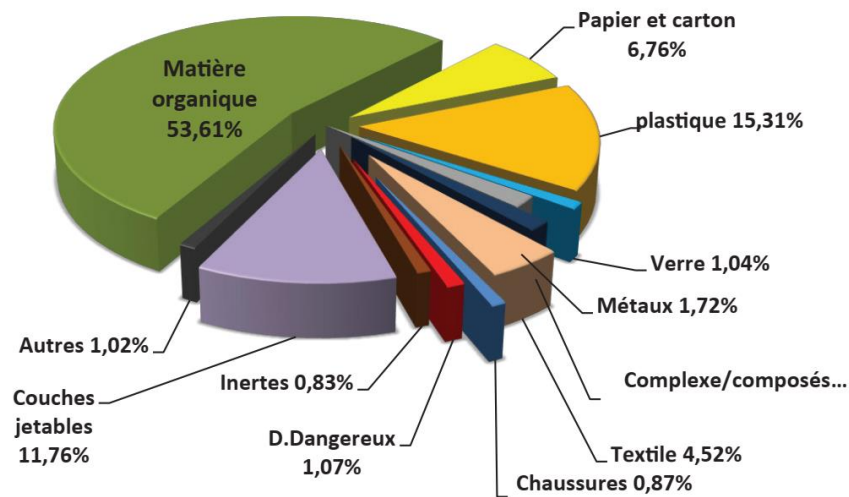


Figure 1.1 : Composition moyenne des déchets ménagers et assimilés en Algérie entre avril 2018 et mars 2019 ([Agence nationale des déchets, 2019](#)).

Il est révélé que les déchets plastiques représentent 15.31 % des déchets ménagers et assimilés générés annuellement, soit environ 2.1 millions de tonnes.

1.4 Déchets plastiques

En raison de sa polyvalence, de sa résistance, de sa légèreté et de son faible coût, le plastique est considéré comme un matériau idéal actuellement utilisé dans une large gamme de produits de consommation courante, en particulier les produits à usage unique qui ne sont généralement utilisés qu'une seule fois sur une courte durée (sacs, bouteilles, pots de yaourt, etc.) ([Agence nationale des déchets, 2020b](#)).

Selon la figure 1.1 établie par l'[Agence nationale des déchets](#) en 2019, les déchets plastiques ont représenté 15.31 % des déchets ménagers et assimilés générés annuellement, soit environ 2.1 millions de tonnes. L'analyse des sous-catégories de déchets plastiques a révélé que le PEBD est prédominant, représentant près de 8,14 % suivi du PET qui représente environ 3.57 % de la quantité totale de déchets générés (voir figure 1.2).

D'autre part, une autre campagne saisonnière de surveillance et de suivi des déchets côtiers, initiée par le ministère de l'environnement algérienne, et lancée dans 3 wilayas pilotes (Jijel,

Tipaza et Ain Timouchent) en 2018, a montré que 80 et 85% des déchets présents sur les plages sont des déchets plastiques (Agence nationale des déchets, 2020b).

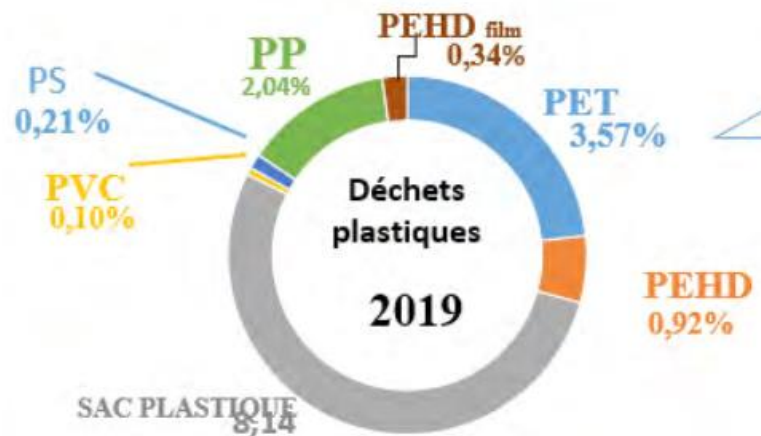


Figure 1.2 : Composition des déchets plastiques par sous-catégories (Agence nationale des déchets, 2019).

1.4.1 Aperçu des différentes catégories de plastique à usage unique en Algérie

L'étude menée par l'Agence nationale des déchets (2020b) a également montré que les catégories de déchets plastiques à usage unique les plus courantes en Algérie sont le polyéthylène téréphtalate, le polyéthylène, le polypropylène et le polystyrène.

A. Le polyéthylène téréphtalate

Le polyéthylène téréphtalate, abrégé PET ou PETE, est un polyester thermoplastique obtenu par la polycondensation de l'acide téréphtalique ou du téréphtalate de diméthyle et de l'éthylène glycol.

Le PET a de multiples utilisations alimentaires, notamment dans la fabrication de bouteilles d'eau et de boissons. Le polyéthylène téréphtalate (PET) peut prendre entre 100 et 400 ans pour se décomposer et se fragmenter en microparticules appelées micro plastiques. Cette lente dégradation contribue à sa prolifération dans l'environnement, où il est couramment retrouvé sous forme de déchets provenant des bouteilles d'eau et de boissons. Le polyéthylène téréphtalate (PET) constitue 3,57 % de la quantité totale des déchets générés chaque année, ce qui correspond à 15,59 milliards de bouteilles d'eau et de boissons d'une capacité de 1,5 L. Il se classe ainsi comme le deuxième produit à usage unique le plus répandu dans l'environnement terrestre. En moyenne, un Algérien consomme 15 kg de PET, soit l'équivalent de 363 bouteilles de 1,5 L par an. Le PET, étant entièrement recyclable et

largement utilisé, est le matériau le plus récupéré et recyclé, et est généralement transformé en fibres ([Agence nationale des déchets, 2020b](#)).

B. Les polyéthylènes

Le polyéthylène (PE) est le polymère dont la production est la plus importante. En fonction de leur procédé de polymérisation, on distingue le polyéthylène basse densité (PEBD) et le polyéthylène haute densité (PEHD).

Le PEBD est utilisée souvent dans la fabrication des sachets, sacs, sacs poubelle, films...etc. Les sacs plastiques, très légers, sont aisément emportés par le vent, se retrouvent accrochés aux arbres et polluent durablement les milieux terrestres et marins, où ils représentent une menace sérieuse pour la vie environnementale. Selon la campagne nationale de caractérisation des déchets ménagers et assimilés en sous-catégorie (AND-2019), environ 23 milliards de sacs plastiques de tous types, soit environ 557 sacs par habitant par année sont générées annuellement par les ménages en Algérie. Le PEHD est un plastique solide, employé dans la production : de bouchons ; des films d'emballages de caisse en industrie ; bouteilles de détergents/ cosmétiques ; ...etc. En Algérie, les plastiques en PEHD représentent 1,26 % de l'ensemble des déchets ménagers produits ([Agence nationale des déchets, 2020b](#)).

C. Le polypropylène

Le polypropylène (PP) est un plastique obtenu par polymérisation du propylène. Il se caractérise par ses bonnes propriétés isolantes. Il est mis en œuvre par injection (mêmes applications que le polyéthylène haute densité, mais avec une meilleure résistance à la chaleur) et par extrusion.

Grâce à son aspect brillant et à sa résistance, ce polymère est utilisé pour la production d'emballages alimentaires jetables tels que des flacons, des gobelets, des pailles, des pots de yaourt, etc. Le polypropylène est l'un des plastiques les plus difficiles à recycler. Toutefois, ils représentent 2,04 % des déchets ménagers et assimilés produits ([Agence nationale des déchets, 2020b](#)).

D. Le polystyrène (PS)

Le polystyrène (PS), un polymère, est un plastique obtenu par polymérisation des monomères de styrène. Il est largement utilisé dans la fabrication de certains produits du quotidien,

comme les emballages en mousse, les gobelets et verres en plastiques, les jouets et les contenants alimentaires jetables pour plats à emporter.

Le polystyrène, souvent présent dans l'environnement marin, est classé parmi les dix objets les plus retrouvés sur les plages algériennes. Il provient principalement d'activités touristiques, sous forme de contenants alimentaires et de restauration rapide. En raison de sa nature très légère et de sa faible rentabilité, il n'est pas recyclé ([Agence nationale des déchets, 2020b](#)).

1.5 Efficacité de l'utilisation des déchets plastiques pour l'amélioration des sols.

L'efficacité de l'utilisation des déchets plastique pour améliorer les propriétés mécaniques et les paramètres de résistance du sol a été étudiée par plusieurs chercheurs ([Consoli et al., 2002](#) ; [Acharyya et al., 2013](#) ; [Dutta et Mandal, 2013](#) ; [Singh et al., 2017](#) ; [Karmacharya et Acharya, 2017](#) ; [Peddaiah et al., 2018](#) ; [Niyomukiza et al., 2021](#) ; [Hassan et al., 2021](#) ; [Al-Haddad et al., 2022](#)).

Les résultats des essais menés par [Benson et Khire \(1994\)](#) ont montré que le renforcement du sable avec des bandes de polyéthylène haute densité récupéré améliore sa résistance à la déformation et augmente sa résistance au cisaillement, son angle de frottement, sa capacité portante (CBR) et son module sécant.

[Dutta and Venkatappa Rao \(2004\)](#) ont constaté que les performances des échantillons de sable s'amélioraient lorsque des bandes de déchets plastiques en polyéthylène y étaient ajoutés. [Consoli et al., \(2002\)](#) ont montré que le renforcement en fibres de polyéthylène téréphtalate améliorait la résistance maximale et ultime des sols cimentés et non cimentés et réduisait quelque peu la fragilité du sable cimenté. [Dutta et Sarda \(2008\)](#) ont constaté que l'ajout de bandes de plastique recyclé en polyéthylène haute densité à la poussière de pierre entraînait une augmentation appréciable de ses valeurs CBR et de son module sécant, et que le bénéfice du renforcement augmentait avec l'augmentation de la teneur et de la longueur des bandes de plastique recyclé. [Choudhary et al. \(2010\)](#) ont également trouvé une augmentation des valeurs CBR et du module sécant du sable avec l'ajout de bandes de polyéthylène haute densité récupérées.

Les résultats des essais triaxiaux non drainés obtenus par [Babu et Chouksey \(2011\)](#) ont montré une amélioration significative de la résistance du sol avec l'inclusion de déchets de bouteilles d'eau en plastique, caractérisée par une augmentation du déviateur de contraintes (figure 1.3) et une diminution de la pression interstitielle. Ils ont attribué cette augmentation

de la résistance du sol à l'augmentation du frottement entre le sol et les déchets plastiques et au développement de contraintes de traction dans ces derniers. Ils ont également constaté une réduction significative des paramètres de compression des sols mélangés à des déchets plastiques.

Contrairement à la rupture fragile des échantillons de sol non renforcés, [Botero et al. \(2015\)](#) ont constaté que les échantillons renforcés de fibres PET présentaient un comportement ductile variable selon la teneur en fibres, ce qui favorise l'amélioration de la résistance à la fissuration du sol. Ces résultats les ont amenés à conclure que le renforcement des sols limoneux et argileux par des fibres PET discrètes selon une orientation aléatoire peut être mis en œuvre dans des situations impliquant de faibles charges appliquées au sol en raison de sa faible résistance au cisaillement, ou lorsque le sol est susceptible de subir des tassements différentiels.

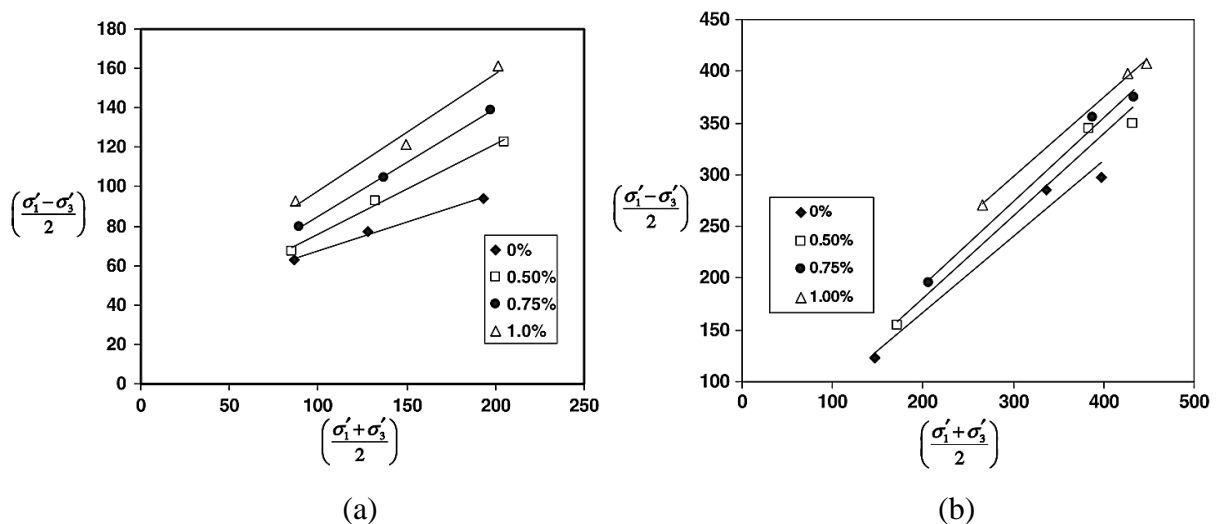


Figure 1.3 : Enveloppes de rupture de Mohr-Coulomb modifiées à différents pourcentages de déchets plastiques : (a) sol rouge (b) sable ([Babu et Chouksey, 2011](#)).

De leur côté, [Peddaiah et al. \(2018\)](#) ont étudié le comportement d'un mélange de sable limoneux et de bandes de bouteilles en plastique PET en effectuant une série d'essais de compactage, de cisaillement direct et de tests CBR tout en faisant varier le pourcentage de déchets plastiques. Sur la base de leurs résultats, une augmentation significative du poids volumique sec maximum, des paramètres de résistance au cisaillement et de la valeur CBR avec l'ajout de plastique au sol a été enregistrée, où l'ampleur d'amélioration des propriétés du sol dépend du type de sol, de la teneur en plastique et de la taille des bandes plastiques. [Peddaiah et al. \(2018\)](#) ont également observé que l'amélioration des propriétés techniques du

sable limoneux est obtenue avec une teneur en plastique de 0,4 % et une taille de bande de (15 mm × 15 mm).

Hassan et al. (2021) ont démontré que la résistance à la compression non confinée des échantillons d'argile contenant du polyéthylène téréphtalate était supérieure à celle des échantillons d'argile mélangés à du polypropylène, quelle que soit la longueur des fibres (1 cm ou 2 cm, voir figure 1.4). Il a également été trouvé que, dans tous les cas, les valeurs obtenues en utilisant des fibres de 2 cm de long sont les plus grandes.

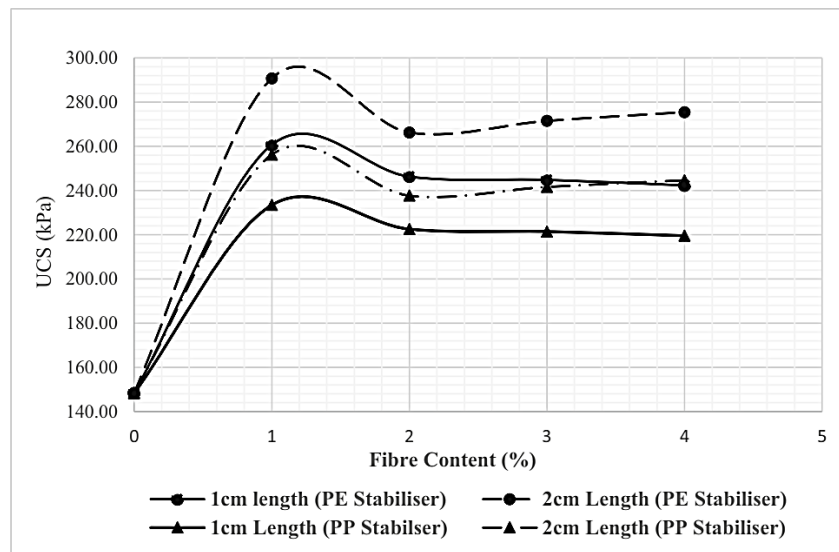


Figure 1.4 : Résultats d'essais de résistance à la compression non confinée réalisés sur un sol argileux mélangé à des déchets plastiques PET et PP. (Hassan et al., 2021).

Haider et al. (2023) ont montré que le sol stabilisé avec du ciment et des copeaux de plastique PET présentait une meilleure durabilité à l'exposition au mouillage et au séchage et une fragilité réduite par rapport au sol stabilisé avec du ciment seul.

1.6 Conclusion

Ce chapitre a fourni un aperçu des statistiques sur les déchets ménagers, y compris les déchets plastiques, générés en Algérie et un résumé de certaines recherches antérieures qui ont étudié l'efficacité de l'utilisation des déchets plastiques comme additif pour améliorer les performances du sol. Il s'est avéré que certains types de déchets plastiques ont un potentiel remarquable et peuvent être utilisés comme additifs dans le processus d'amélioration.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation des caractéristiques physiques des matériaux étudiés, du dispositif utilisé et du mode opératoire suivi pour réaliser la partie expérimentale de ce travail.

Chapitre 2

Dispositif expérimental et mode opératoire

2.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation des propriétés physiques des matériaux étudiés, des équipements utilisés ainsi que de la démarche expérimentale, incluant les différentes étapes de préparation des échantillons, adoptée pour mener cette étude. Tous les essais ont été réalisés au laboratoire de mécanique des sols de l'université Hassiba Benbouali de Chlef, en Algérie.

2.2 Matériaux utilisés

2.2.1 sable de Chlef

Le sol utilisé dans cette étude est le sable de Chlef qui est un sable provenant des rives de l'oued Chlef dont les particules sont de forme arrondie. Il a été démontré que le sol de cette région peut souffrir de problèmes d'instabilité dans certaines conditions (Arab, 2009 ; Della et al., 2011 ; Belkhatir et al., 2014 ; Della et al. 2014). Cela a fait de la possibilité d'améliorer ses propriétés, en utilisant les différentes méthodes de renforcement actuellement utilisées, un sujet d'intérêt pour plusieurs études antérieures et actuelles.

Une fois le sable collecté, les particules d'un diamètre supérieur à 2 mm ont été éliminées par tamisage à sec, puis le reste a été séché jusqu'à masse constante (figure 2.1).



Figure 2.1 : Sable naturel de Chlef.

La distribution granulométrique du sable est illustrée à la figure 2.2 et ses principales caractéristiques physiques sont résumées dans le tableau 2.1. Le sable est considéré comme un

sable moyen avec un diamètre moyen d'environ 0,50 mm et classé comme un sable propre mal gradué (Sm) selon la classification LCPC.

Tableau 2.1 : Caractéristiques physiques du sable de Chlef étudié.

Forme	ρ_s (g/cm ³)	e_{min} (.)	e_{max} (.)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Cu (.)	Cc (.)
Arrondie	2.61	0.406	0.904	0,175	0,310	0,495	0,600	3,428	0,915

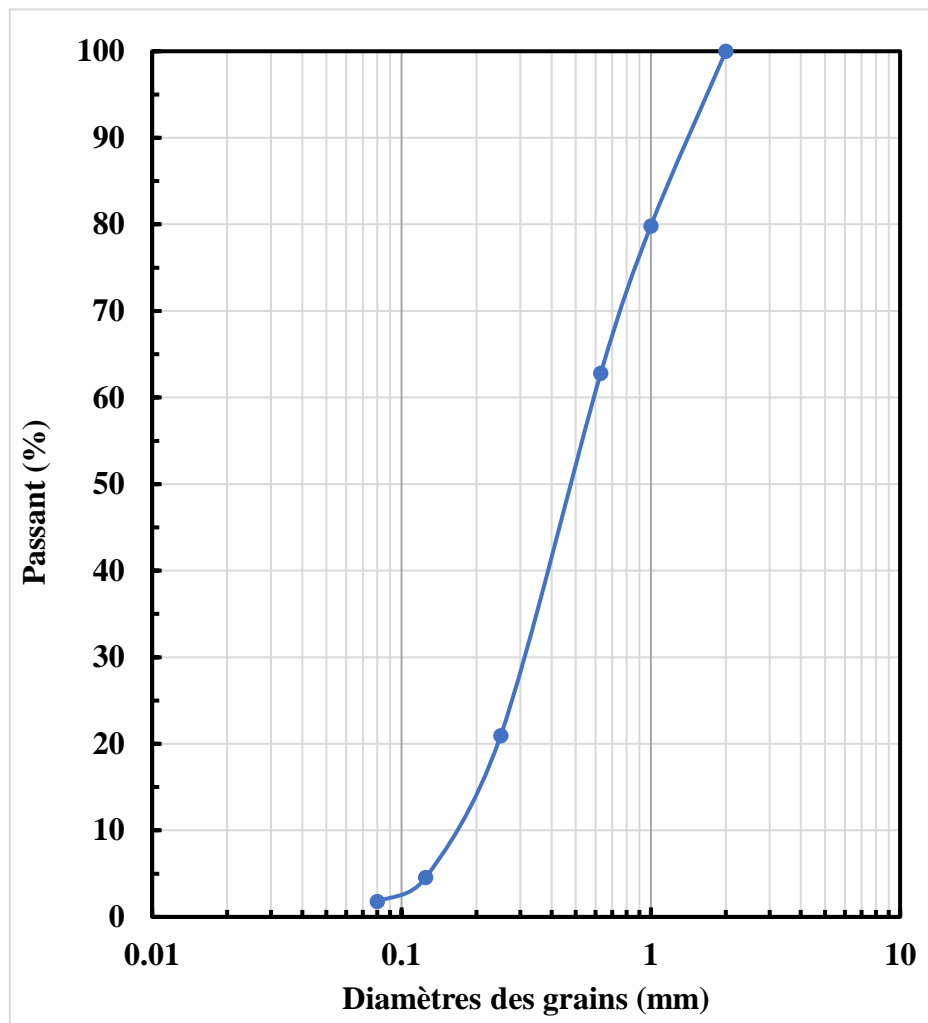


Figure 2.2 : Courbe granulométrique du sable de Chlef.

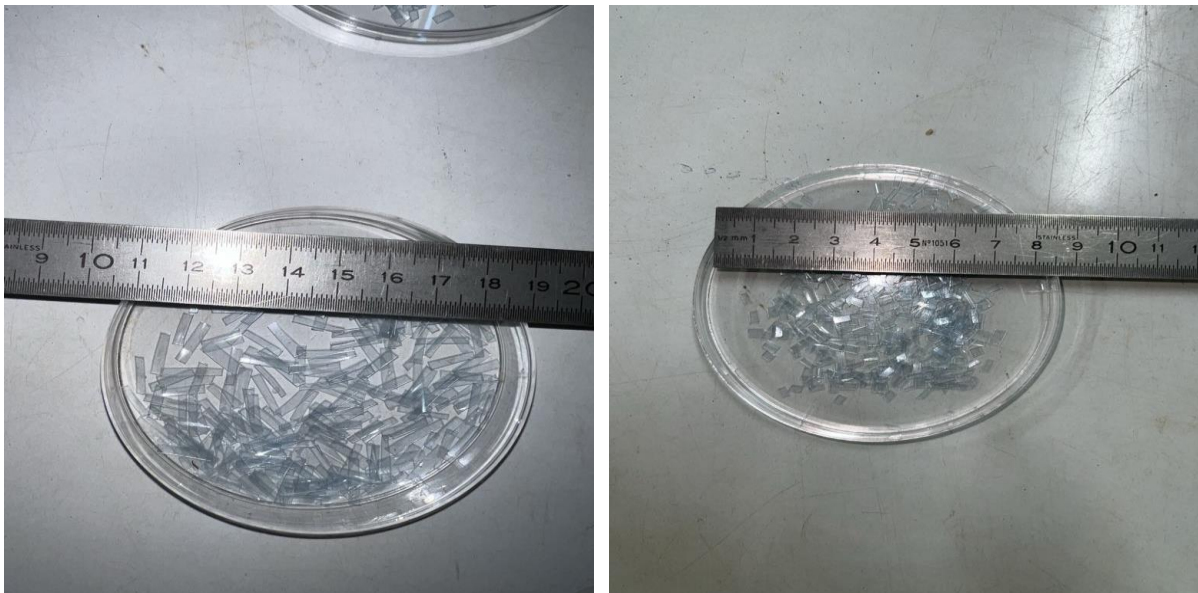
2.2.2 Déchets plastique PET

Les déchets plastiques utilisés dans cette étude proviennent de bouteilles d'eau en polyéthylène téréphtalate (PET). Les bouteilles ont d'abord été soigneusement lavées à l'eau (figure 2.3), puis parfaitement séchées avant d'être découpées manuellement en petits morceaux. Deux

formes ont été construites pour étudier leur effet : des bandes de plastique d'environ 1 cm de long et 2 mm de large, et des paillettes de plastique carrés d'environ $2 \times 2 \text{ cm}^2$ de section (figure 2.4). La masse volumique du polyéthylène téréphtalate (PET) varie entre 1,3 et 1,4 g/cm^3 (Wypych, 2016).



Figure 2.3 : Bouteille d'eau en PET prête à être découpée.



(a) Bandes de plastique

(b) Paillettes de plastique

Figure 2.4 : Déchets de plastiques PET utilisées.

2.3 Dispositif expérimental

Le programme expérimental ne comprend que des essais de cisaillement direct. L'essai de cisaillement direct est un essai très ancien, utilisé pour la première fois par [Coulomb](#) en 1776 ([Lamb et Whitman, 1969](#)). Il permet d'évaluer de manière directe la résistance au cisaillement ainsi que de déterminer les caractéristiques de résistance au cisaillement souvent utilisées dans le dimensionnement des fondations et dans l'étude de stabilité du sol qui constitue l'ouvrage ou sert de support à la structure. Le dispositif de cisaillement utilisé pour réaliser la partie expérimentale de cette étude est illustré à la figure 2.5.



Figure 2.5 : Appareil de cisaillement direct utilisé (laboratoire de mécanique des sols de l'université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie).

Il est composé des éléments de base suivants :

- Un bâti
- Une boîte de cisaillement (figure 2.6), elle comporte les éléments suivants :
 - Deux demi-boîtes à parois rigides comportent un évidement carré pour l'échantillon de 60 mm de côté ;
 - Deux vis permettant la solidarisation des demi-boîtes (avant l'essai) ;
 - Un châssis étanche mobile supporte la demi-boîte inférieure ;
 - Une plaque de maintien (une base rigide) ;
 - Un piston rigide de chargement ;
 - Deux plaques drainantes (ou pierres poreuses) ;
 - Deux grilles solides.
- Un système de chargement vertical permettant l'application d'une force normale N sur la partie supérieure du piston.

- Un moteur utilisé pour appliquer une force horizontale de cisaillement T sur la demi-boîte inférieure qui se déplace par rapport à l'autre.
- Un system de mesure, il se compose de trois capteurs qui servent à mesurer la force horizontale de cisaillement T , le déplacement horizontal δh , et le déplacement vertical du piston δv .
- Un système d'enregistrement et d'affichage de données, qui comprend une acquisition connectée à un ordinateur.

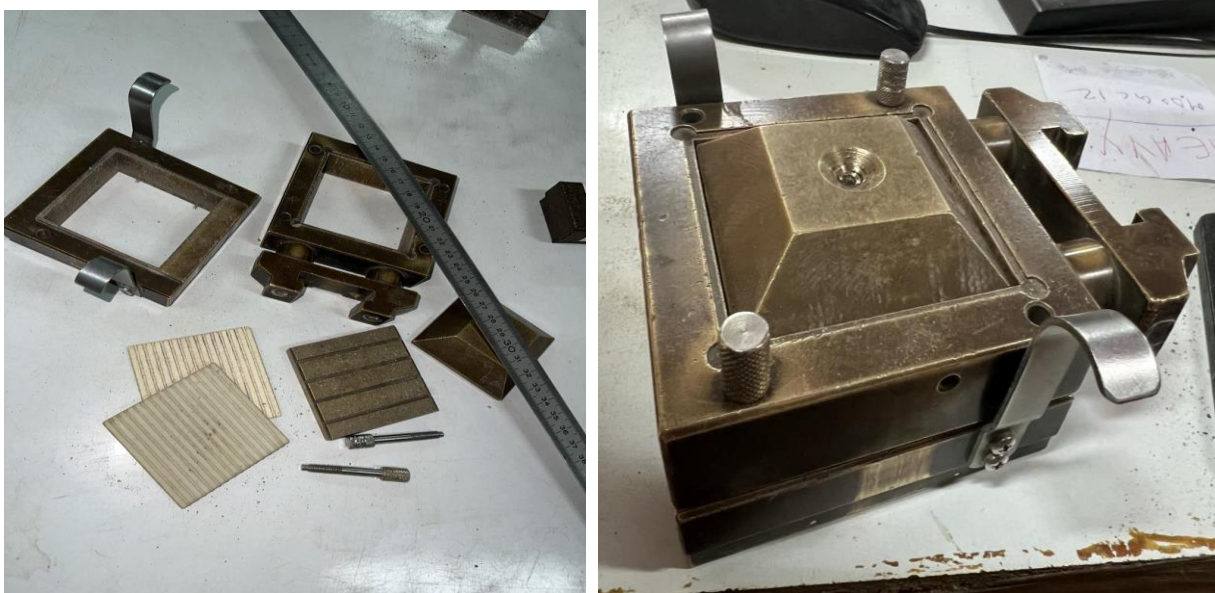


Figure 2.6 : Boîte de cisaillement.

2.4 Mode opératoire

2.4.1 Préparation de l'échantillon

Les échantillons testés étaient des mélanges composés principalement de sable et de petites fractions de déchets plastiques ($P_c = 0 \%$, $0,75 \%$ et $1,5 \%$). Ils ont été préparés à deux densités différentes selon deux méthodes de préparation distinctes : le dépôt à sec ($w = 0 \%$) et le dépôt humide ($w = 5 \%$). La hauteur initiale était d'environ $2,7 \text{ mm}$ et $2,9 \text{ mm}$ pour les échantillons secs et humides respectivement. La préparation des échantillons commence par le calcul de la masse sèche de sable nécessaire pour remplir le volume souhaité, déterminée comme suit :

$$I_d = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$$

$$M_s = (G_s \times V_T) / (1 + e)$$

Ensuite, les quantités de déchets, qu'il s'agisse de bandes ou de paillettes, et d'eau nécessaires à la préparation de chaque mélange sont déterminées selon les formules suivantes :

$$\text{Masse d'eau (M}_w) = \text{teneur en eau (w) x M}_s$$

$$\text{Masse de déchets plastiques (M}_D) = \text{teneur en déchets plastiques (Pc) x M}_s$$

Une fois les demi-boîtes fixés à l'aide de deux vis, la plaque de maintien est positionnée au fond de la boîte de cisaillement, suivie de la plaque grille. Ensuite, en utilisant l'une des techniques de préparation, le mélange parfaitement mixé de sable et de déchets est placé dans la cavité de la boîte.

A l'état sec, le mélange sec (figure 2.7a) est déposé en trois couches d'égale hauteur, chaque couche subit 25 coups à l'aide d'une dame afin d'obtenir l'état dense, tandis que pour l'état moyennement dense, le compactage se fait toujours à l'aide de la dame mais sans coups, en utilisant uniquement la force de la main en respectant la hauteur de chaque couche. A l'état humide, une teneur initiale en eau de 5% est ajoutée au mélange de sable et de déchets, puis le tout est bien mixé jusqu'à ce que le mélange devienne homogène (figure 2.7b) après quoi il est posé en trois couches avec compactage comme à l'état sec.

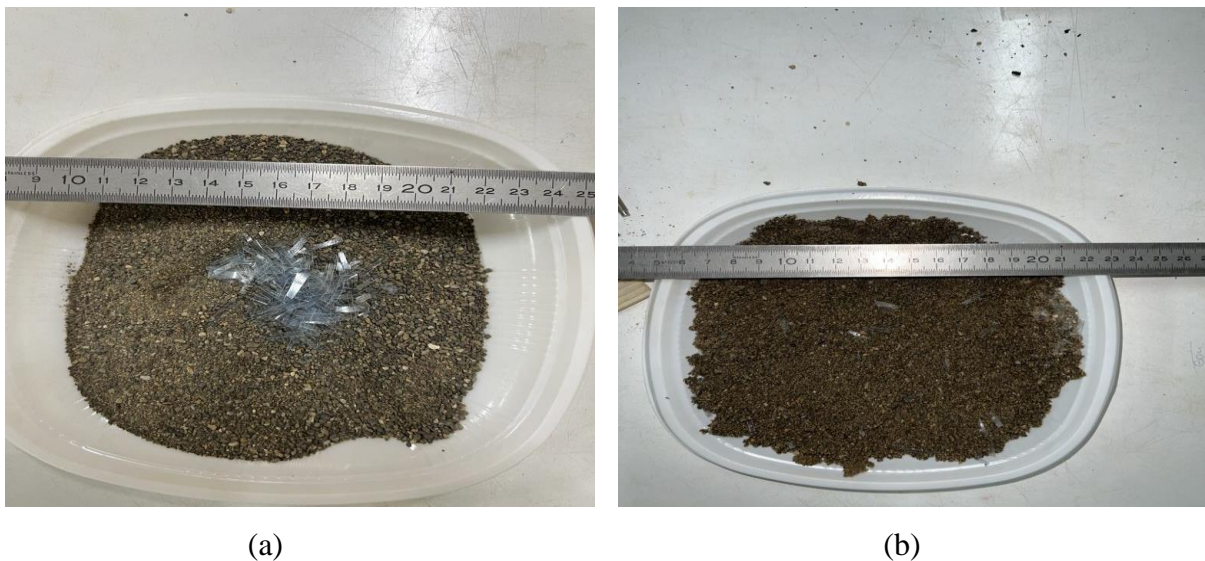


Figure 2.7 : Mélange composé de sable et de déchets plastiques (PET) : (a) mélange sec ; (b) mélange humide.

Après le dépôt de l'échantillon (figure 2.8), la deuxième plaque de grille est placée sur sa face supérieure, suivie du piston de chargement. La boîte de cisaillement est ensuite remise à sa place dans le châssis fixé sur le bâti au cas où elle serait déplacée pour préparer l'échantillon.

2.4.2 Consolidation et cisaillement de l'échantillon

La consolidation de l'échantillon est réalisée au moyen d'un système de chargement vertical, placé sur le piston, et de masses fendues qui représentent la charge verticale et doivent être placées sur le plateau de chargement. Chaque mélange est testé sous trois contraintes normales différentes : 100 kPa, 200 kPa et 300 kPa. La consolidation est considérée comme achevée lorsque le déplacement vertical de l'éprouvette se stabilise sous l'effet des charges appliquées. Ensuite, les deux vis fixant les demi-boîtes sont retirées, et le cisaillement de l'échantillon est effectué à une vitesse constante de 1 mm/min jusqu'à atteindre un déplacement horizontal de 7,5 mm. Les lectures des capteurs de déplacement vertical (δv) et de force (T) sont automatiquement enregistrées simultanément pour chaque augmentation du déplacement horizontal (δh).



Figure 2.8 : boîte de cisaillement est placée dans la machine de cisaillement

2.4.3 Traitement des résultats

À la fin de l'essai, les données des trois paramètres obtenus permettent de tracer les courbes typiques d'un essai de cisaillement. La contrainte de cisaillement (τ) est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$\tau = T / A$$

Où A est la surface initiale de l'éprouvette, égale à 60 x 60 mm². Les ajustements dus aux variations de l'aire cisillée pendant l'essai ne sont pas pris en compte, et seule la valeur de l'aire initiale est utilisée.

Les courbes de variations de la contrainte de cisaillement et du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal sont ensuite tracées pour chaque contrainte normale (100, 200 et 300 kPa). Les résultats typiques d'un essai de cisaillement direct réalisé sur un sol sableux sont présentés à la figure 2.9. On observe que la contrainte de cisaillement du sable dense augmente brusquement jusqu'à atteindre un maximum, puis diminue jusqu'à atteindre un état stable (état critique), tandis que la contrainte de cisaillement du sable lâche augmente continuellement jusqu'à atteindre approximativement le même état critique que le sable dense (figure 2.9a).

Quant à la variation du déplacement vertical (Figure 2.9b), on constate que l'échantillon de sable dense subit d'abord un petit tassement (phase de contractance), puis il commence à gonfler (phase de dilatance) jusqu'à la fin de l'essai. En revanche, l'échantillon de sable lâche présente un comportement totalement contractant, où le volume continue de diminuer à mesure que le déplacement horizontal se développe.

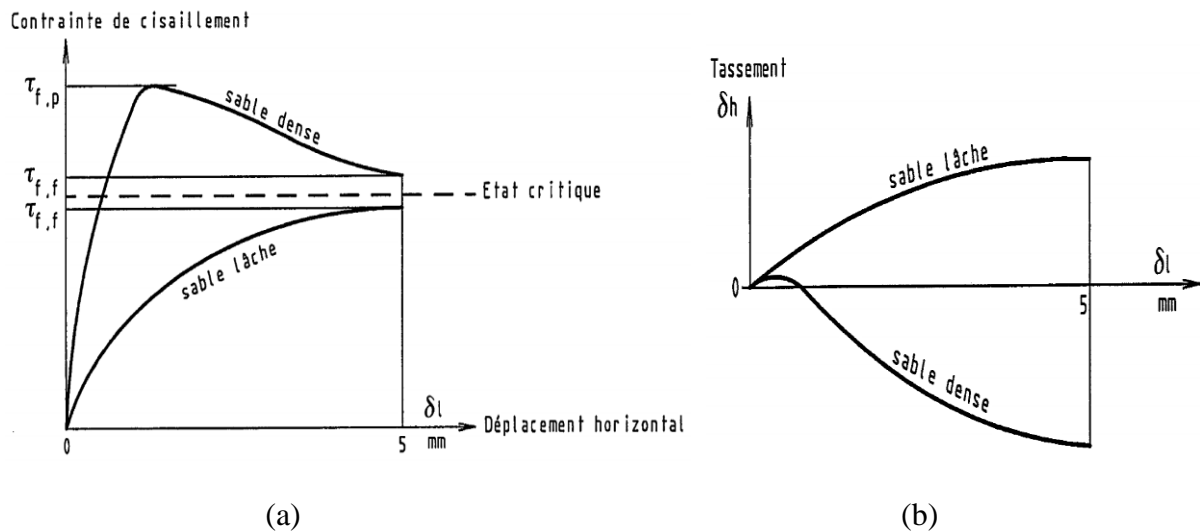


Figure 2.9 : Résultats typiques d'un essai de cisaillement direct sur un sol sableux : (a) contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal ($\tau - \delta h$) ; (b) déformation verticale en fonction du déplacement horizontal ($\delta v - \delta h$) (d'après [NF P94-071-1](#)).

Les paramètres de cisaillement, à savoir la cohésion (C) et l'angle de frottement interne (φ), peuvent ensuite être déterminés à partir de l'enveloppe de rupture de Mohr-Coulomb (ou droite de Mohr-Coulomb), qui représente la relation entre la contrainte de cisaillement maximale τ_{\max} et la contrainte normale σ_N (figure 2.10). Cette relation est donnée par la formule suivante :

$$\tau_{\max} = C + \sigma_N \tan \varphi$$

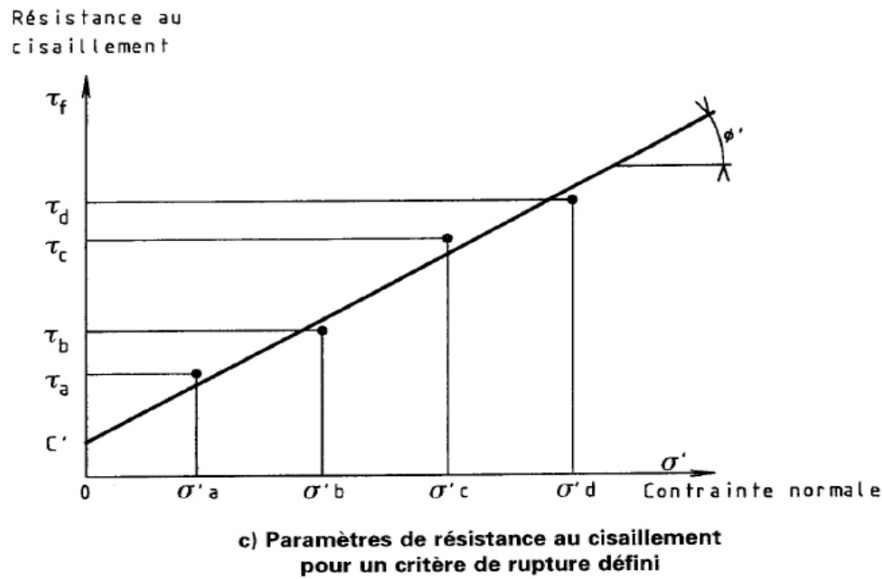


Figure 2.10 : Détermination des paramètres de résistance au cisaillement, C et φ , critère de rupture au pic (d'après [NF P94-071-1](#)).

2.5 Conclusion

Ce chapitre a donné un aperçu des propriétés physiques des matériaux testés, une description de l'appareil expérimental utilisé et les procédures suivies pour effectuer les essais de cisaillement direct.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de l'influence de la teneur en déchets plastiques sur le comportement au cisaillement du sable, en révélant les résultats d'expériences menées sur des mélanges de sable et de plastique PET.

Chapitre 3

Effet de la teneur en déchets plastiques PET sur le comportement au cisaillement d'un sol sableux

3.1 Introduction

Nous avons déjà vu au chapitre un que certains types de déchets plastiques présentent un potentiel prometteur et peuvent être utilisés comme additifs dans le processus d'amélioration des sols. Cependant, les résultats ne sont pas entièrement cohérents car le contenu et la forme des déchets adaptés au processus d'amélioration varient en fonction de différents paramètres tels que le type de sol, le type de plastique et la profondeur cible.

Ce chapitre présente les résultats d'essais de cisaillement direct réalisés pour étudier le comportement au cisaillement du sable mélangé à de faibles fractions de déchets plastiques PET (0 %, 0,75 % et 1,5 %). Les échantillons ont été préparés selon deux méthodes de dépôt différentes ($w = 0\%$ et 5%) et consolidés sous trois contraintes normales ($\sigma_N = 100, 200$ et 300 kPa).

3.2 Effet de la teneur en déchets plastique PET

3.2.1 Etat sec ($w = 0\%$)

A. Bandes plastiques PET

Les résultats des essais de cisaillement réalisés sur des mélanges de sable et de bandes plastiques préparés par la méthode de déposition sèche ($w = 0\%$) sont présentés dans les figures 3.1 à 3.6. La figure 3.1 montre que la contrainte de cisaillement des mélanges denses augmente significativement jusqu'à atteindre une valeur maximale, entre 2 et 3.5 mm de δh , puis elle commence à décroître légèrement avec le développement du déplacement horizontal jusqu'à ce qu'elle arrive à un état résiduel à la fin d'essai. On note également que l'échantillon de sable contenant 1.5 % de bandes plastiques présente une valeur de contrainte de cisaillement maximale légèrement supérieure à celle des autres échantillons, et cela pour les trois contraintes normales.

Des tendances similaires ont été obtenues pour l'état moyennement dense (figure 3.2), où l'on remarque que les trois mélanges montrent un pic de contrainte entre 3 et 4 mm de déplacement horizontal et que le sable mélangé à 1.5 % de bandes plastiques présente toujours une contrainte de cisaillement maximale légèrement supérieure à celle des autres échantillons.

La variation du rapport de contrainte de cisaillement maximale ($\tau_{\max}/\tau_{\max 0\%}$), qui représente le quotient de τ_{\max} du mélange par celle du sable ($PSc = 0\%$), en fonction de la teneur en bandes plastiques est illustrée sur la figure 3.3.

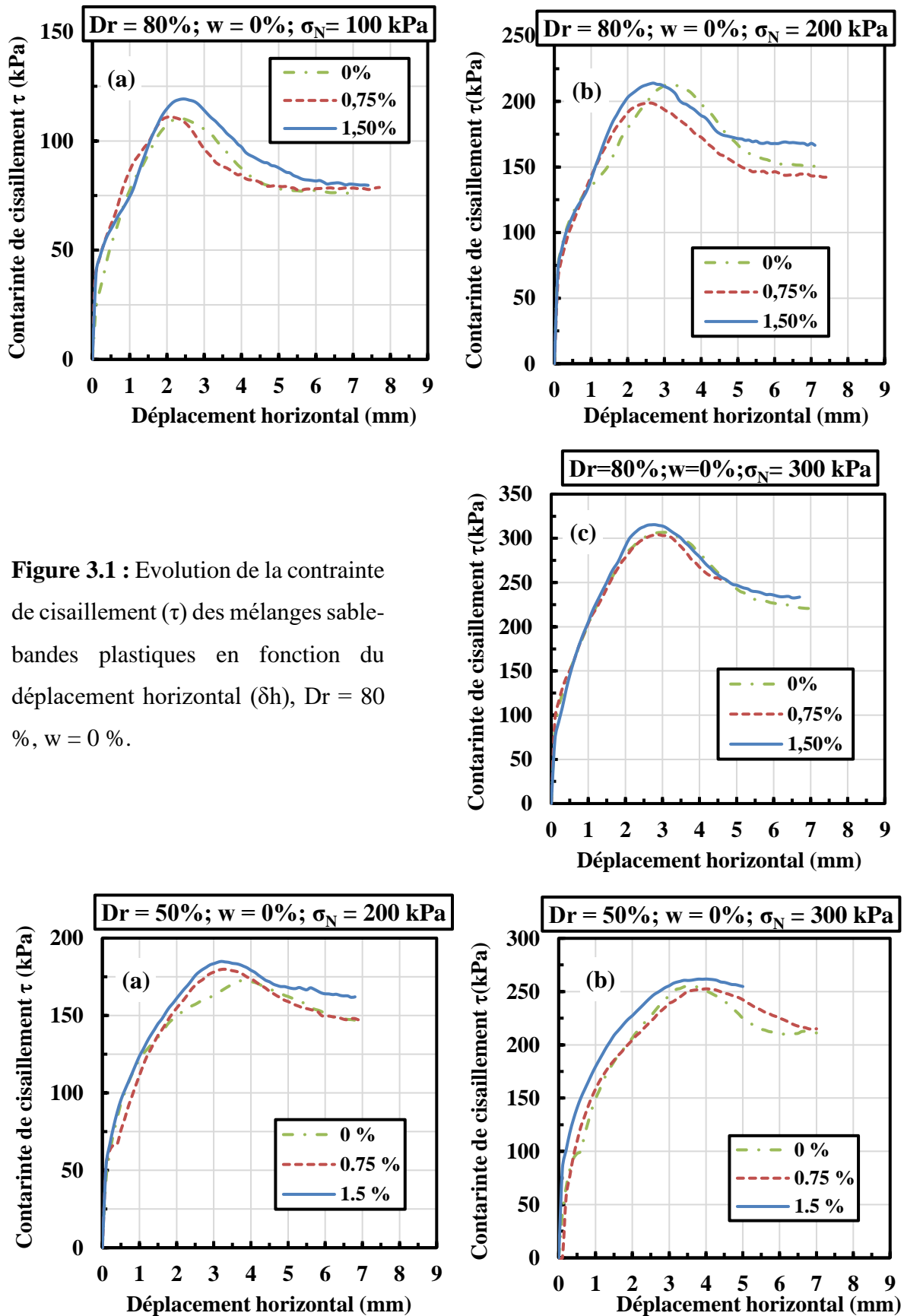


Figure 3.2 : Evolution de la contrainte de cisaillement (τ) des mélanges sable-bandes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), $Dr = 50 \%$, $w = 0 \%$.

Il est clair que le mélange contenant 0.75% de plastiques est inférieure à 1 sous certaines contraintes normales, ce qui signifie une diminution de résistance par rapport celle du sable. En revanche, le mélange à 1.5 % de bandes de plastiques présente toujours un rapport nettement supérieur à 1, ce qui a affecté la tendance générale où une augmentation du rapport de contrainte peut être observée avec l'augmentation de la teneur en déchets plastiques pour les deux états de densité. Cela peut s'expliquer par le fait que les bandes de plastique ajoutées ont non seulement diminué les vides entre les particules de sable, mais ont également réduit le volume de la matrice de sable dans le mélange, ce qui a augmenté l'imbrication entre les particules. On constate également que le taux d'amélioration obtenu en ajoutant 1,5 % de déchets diminue avec l'accroissement de la contrainte normale pour les deux densités.

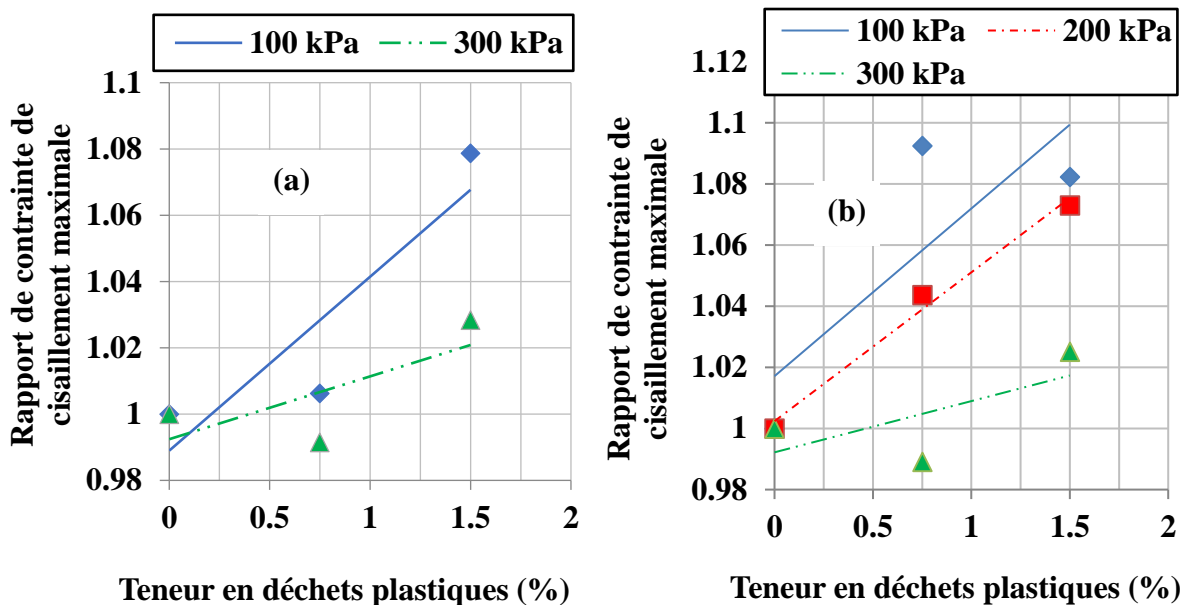


Figure 3.3 : Rapport de contrainte de cisaillement maximale en fonction de la teneur en bandes plastiques, $w = 0\%$: (a) $D_r = 80\%$; (b) $D_r = 50\%$.

La figure 3.4 présente l'évolution du déplacement vertical (δv) des mélanges denses, préparés par voie sèche, en fonction du déplacement horizontal (δh). Quelle que soit la contrainte normale appliquée, les échantillons ont montré un comportement purement dilatant où le déplacement vertical diminue remarquablement entre 0 et 5 mm de déplacement horizontal, puis la diminution devient moins significative. De plus, il est observé que l'augmentation de la teneur en bandes de plastique PET favorise le comportement dilatant du mélange. Cela est généralement dû à un enchevêtrement accru entre les particules des mélanges.

Pour l'état moyennement dense (figure 3.5), après une petite phase de contractance constatée au début du cisaillement, le mélange de sable et de plastique commence à se dilater jusqu'à la

fin d'essai. En outre, il est à noter qu'en général l'ajout de bandes plastiques au sable réduit légèrement sa dilatance au profit de sa contactance.

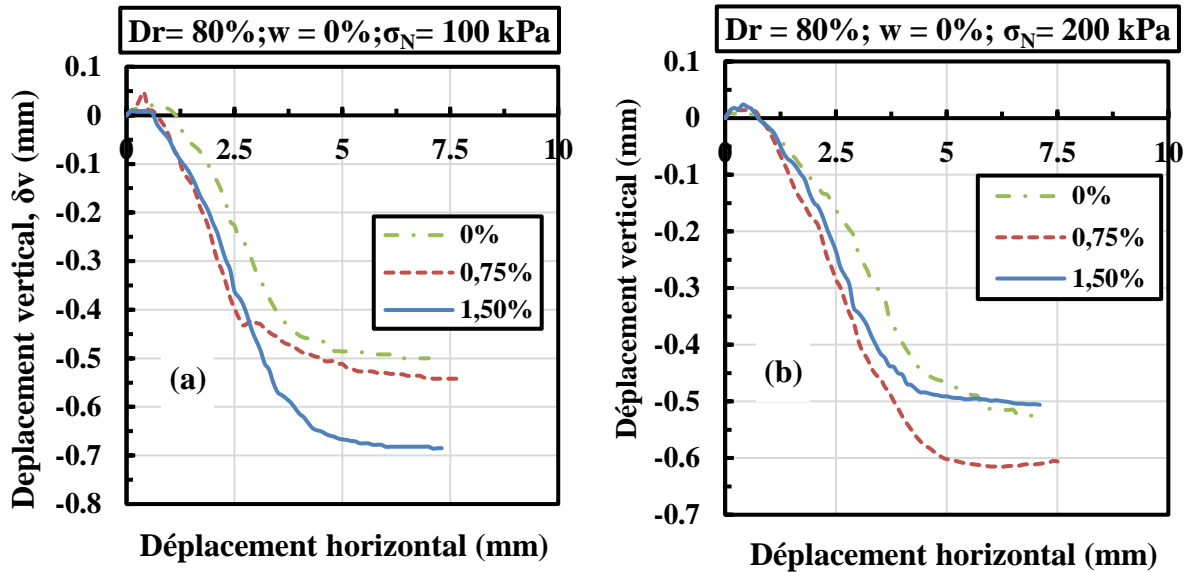


Figure 3.4 : Variation du déplacement vertical (δv) des mélanges sable-bandes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), $D_r = 80 \%$, $w = 0 \%$.

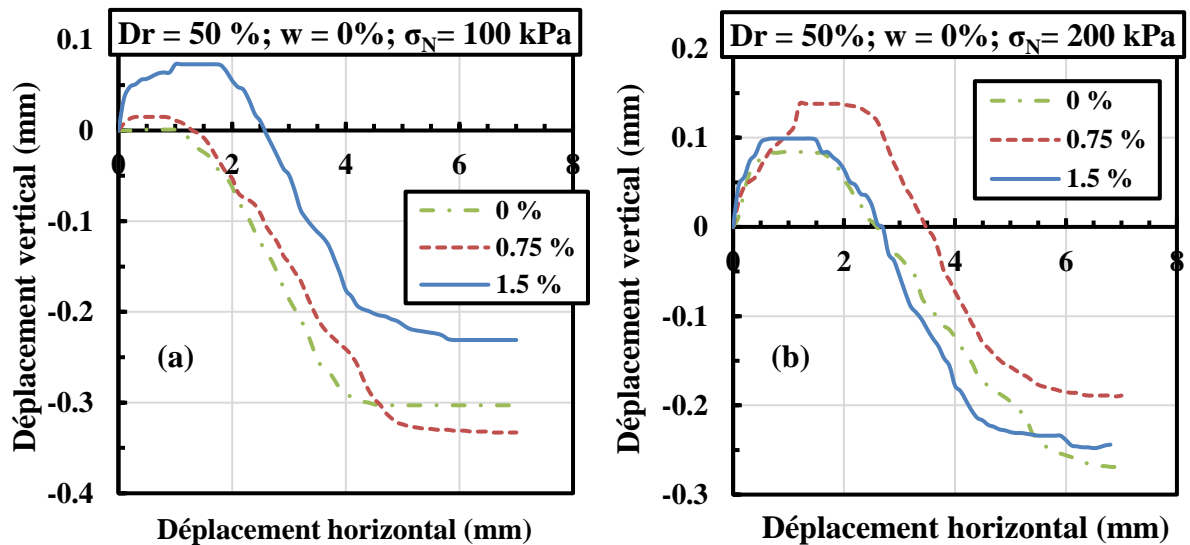


Figure 3.5 : Variation du déplacement vertical (δv) des mélanges sable-bandes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), bandes plastiques, $D_r = 50 \%$, $w = 0 \%$.

La variation des paramètres de résistance au cisaillement, extraits de l'enveloppe de Mohr-Coulomb, en fonction de la fraction de déchets est illustrée à la figure 3.6. On constate que l'ajout de plastique en forme de bande au sable augmente sa cohésion quel que soit l'état de densité initiale. Quant à l'angle de frottement, il est clair qu'il reste quasiment stable à l'état

dense où l'effet de la teneur en déchets est négligeable, tandis qu'une légère diminution est remarquée à densité moyenne.

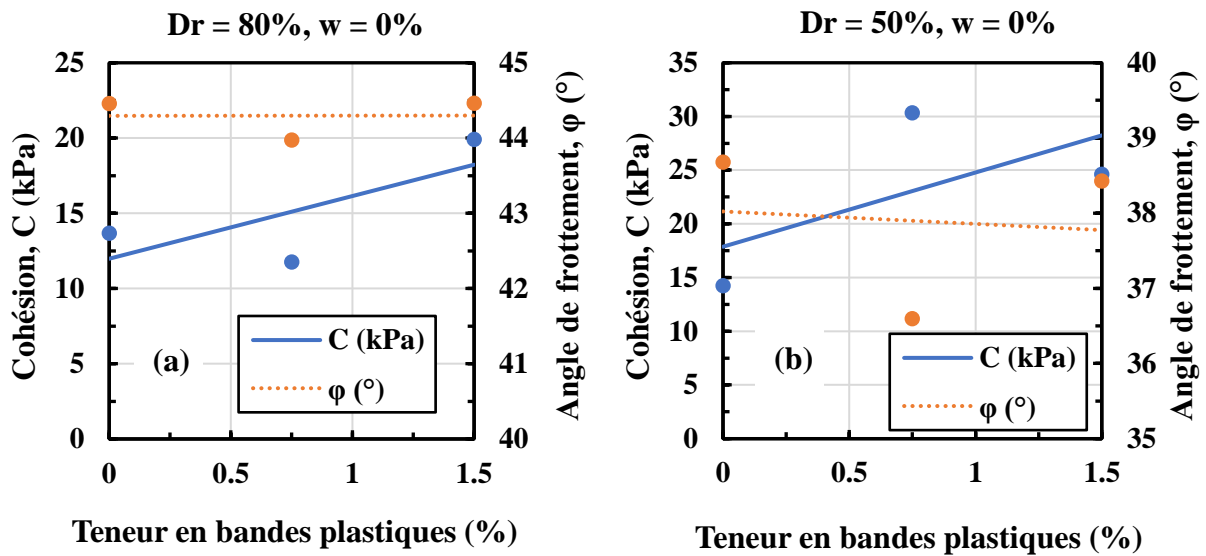


Figure 3.6 : Effet de la teneur en bandes plastiques (PSc) sur les paramètres de résistance au cisaillement du sable, $w = 0\%$: (a) $D_r = 80\%$; (b) $D_r = 50\%$.

D'après ce qui précède, on peut conclure qu'à l'état dense, la teneur en bande de plastique PET de 1,5 % est la teneur idéale à ajouter au sable pour améliorer légèrement son comportement au cisaillement bien que l'angle de frottement reste presque stable. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par [Babu et Chouksey \(2011\)](#) et [Peddaiah et al. \(2018\)](#) où la teneur optimale en déchets plastiques obtenue par eux était respectivement de 1 % et 0,4 %. A l'état moyennement dense, il est vrai qu'une amélioration, en termes de τ et de cohésion, est obtenue en ajoutant des déchets plastiques au sable, mais il faut prendre en considération la légère réduction de l'angle de frottement et du caractère dilatant du mélange.

B. Paillettes en plastique PET de forme carrée

Étant donné que la forme idéale des plastiques coupés pouvant offrir de meilleures performances au sol n'est pas connue, le comportement au cisaillement du sable mélangé à des particules de plastique de forme carrée a également été étudié. La variation du rapport de contrainte de cisaillement illustrée à la figure 3.7 montre que le mélange contenant 1,5 % de paillettes plastiques présente des valeurs de résistance au cisaillement maximale comparables à celles du sable, où l'amélioration est légère et n'est obtenue que sous des contraintes normales de 100 et 200 kPa.

Quant à l'évolution du déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal (figure 3.8), on constate que le mélange ayant 1,5 % de paillettes plastiques carrées présente un comportement purement dilatant et qu'il atteint des valeurs de déformation comparables à celles du sable. Cela signifie que les déchets plastiques de forme carrée ont un effet négligeable sur la variation de volume du sable. D'autre part, la figure 3.9 montre que l'ajout de paillettes de plastique de forme carrée au sable entraîne une légère diminution de son angle de frottement et une augmentation significative de sa cohésion.

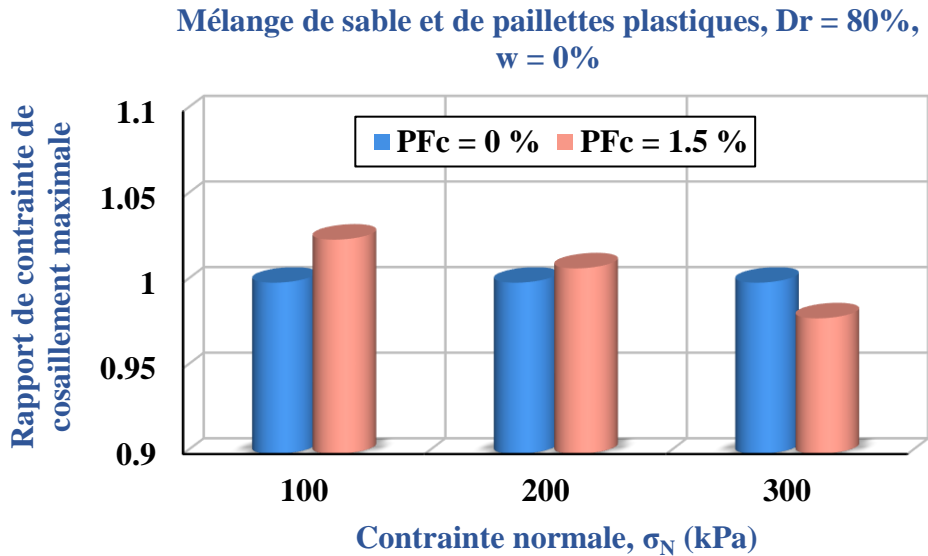


Figure 3.7 : Rapport de contrainte de cisaillement maximale en fonction de la teneur en paillettes de plastique, $D_r = 80\%$, $w = 0\%$.

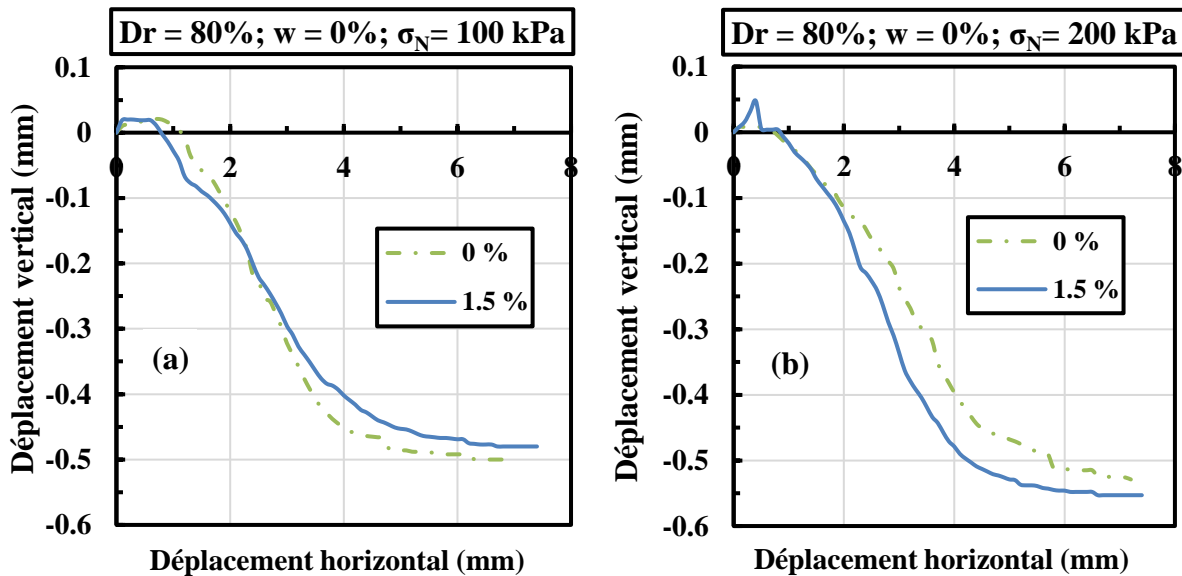


Figure 3.8 : Variation du déplacement vertical (δv) des mélanges sable- paillettes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), $D_r = 80\%$, $w = 0\%$.

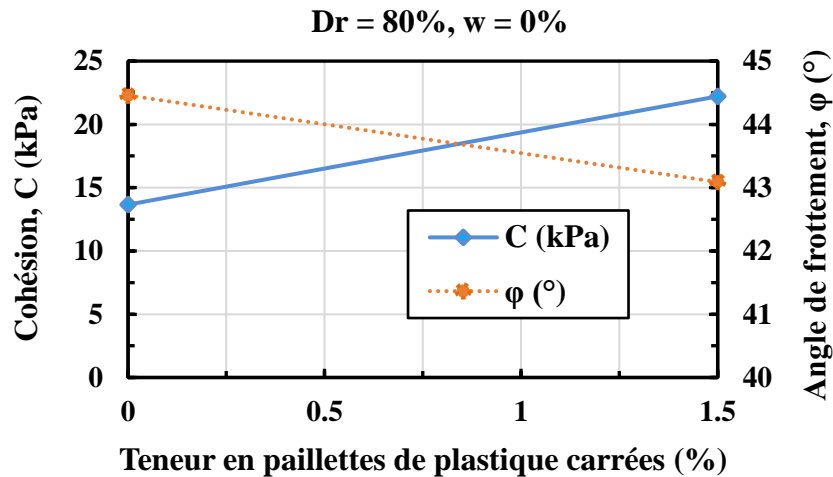


Figure 3.9 : Effet de la teneur en paillettes de plastique carrées sur les paramètres de résistance au cisaillement du sable, $w = 0 \%$, $Dr = 80 \%$.

Ces résultats nous permettent de conclure que les paillettes plastiques de forme carrée peuvent être utilisés pour améliorer le comportement au cisaillement en termes de contrainte de rupture et de cohésion, à de faibles contraintes normales. Ce résultat est principalement dû à l'augmentation de l'imbrication entre les particules du mélange, qui se manifeste clairement dans sa cohésion.

3.2.2 Etat humide ($w = 5\%$)

Seul l'effet des bandes plastiques est étudié à l'état humide. Les figures 3.10 à 3.13 présentent les résultats d'essais de cisaillement effectués sur du sable humide mélangé à différentes teneurs en bandes plastiques ($PSc = 0, 0.75\%$ et 1.5%). En analysant les courbes présentées dans la figure 3.10, une augmentation considérable de la contrainte de cisaillement des échantillons humides est observée au début de l'essai, entre 0 et 3 mm de déplacement horizontal, jusqu'à ce qu'une valeur maximale soit atteinte. Au-delà de 3 mm de δh , la contrainte de cisaillement des échantillons consolidés sous 100 kPa diminue légèrement jusqu'à devenir stable en fin d'essai, tandis que la diminution de τ de la plupart des échantillons après τ_{max} est négligeable sous une contrainte normale de 200 et 300 kPa.

La figure 3.11 illustre la tendance générale de variation de τ_{max} en fonction de la teneur en déchets plastiques. Il est clair que l'ajout de bandes plastiques au sable humide a généralement un faible effet sur sa contrainte de cisaillement maximale et que la légère amélioration de cette dernière n'est obtenue que sous une contrainte normale de 200 et 300 kPa. [Babu et Chouksey \(2011\)](#) et [Peddaiah et al. \(2018\)](#) ont également constaté une augmentation de la résistance au cisaillement du sol mélangé aux déchets plastiques. Cette amélioration est due à l'augmentation

de l'enchevêtrement entre les particules du mélange. Cette explication est basée sur les résultats de tests de compressibilité obtenus par Babu et Chouksey (2011) qui ont montré que plus la teneur en déchets plastiques augmente, plus les vides sont occupés par ces déchets, ce qui conduit à une diminution globale de l'indice des vides.

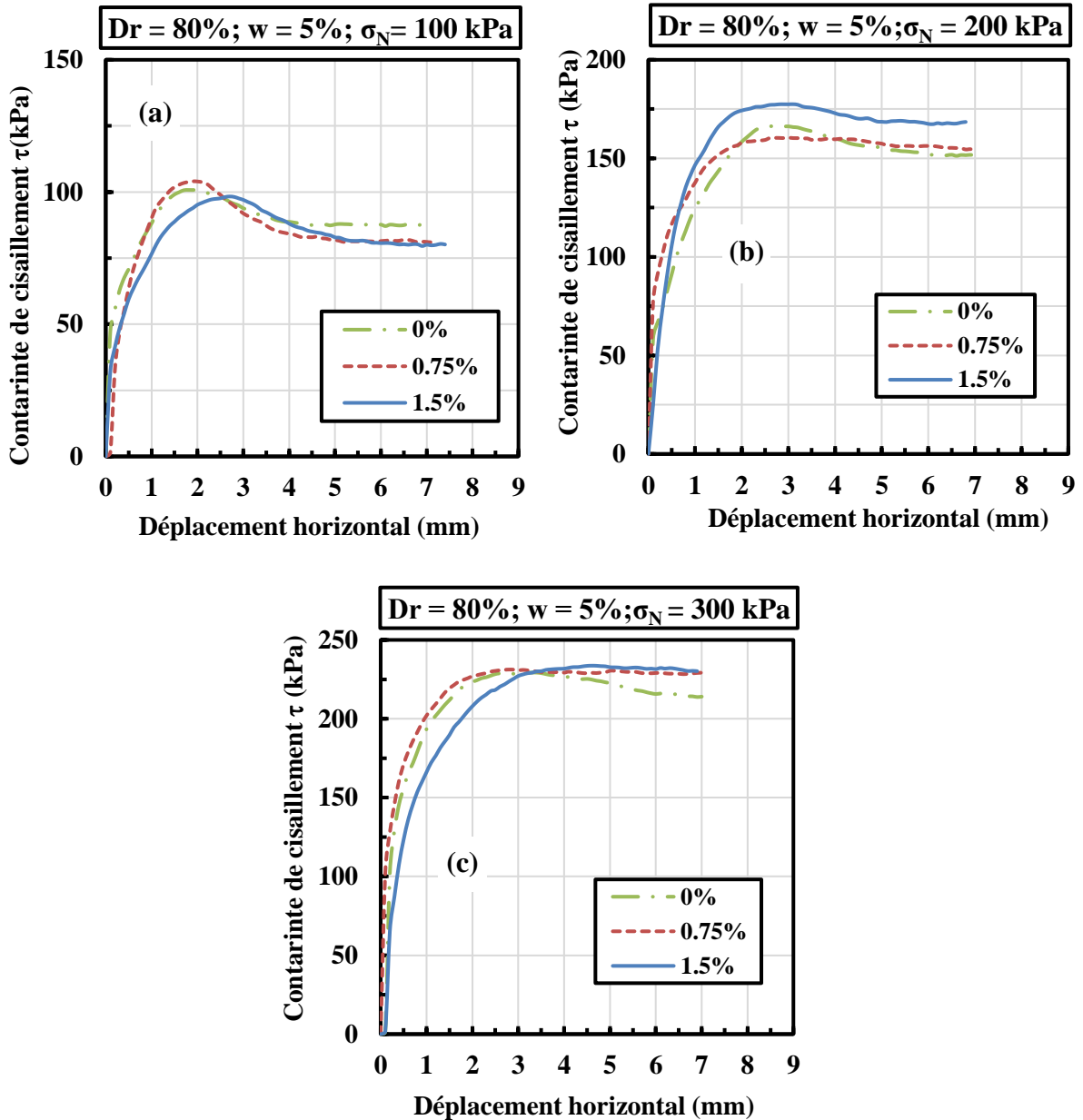


Figure 3.10 : Evolution de la contrainte de cisaillement (τ) des mélanges sable-bandes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), $D_r = 80\%$, $w = 5\%$.

Les courbes de variation du déplacement vertical illustrées dans la figure 3.12 montrent clairement que la majorité des échantillons humides présentent une phase de contractance remarquable au début du cisaillement suivie d'une diminution de volume qui s'est poursuivie avec le développement du déplacement horizontal. De plus, on peut noter que l'addition de

bandes plastiques au sable humide a pour effet de réduire sa contractance et d'accélérer l'apparition de la phase de dilatance. Babu et Chouksey (2011) ont également constaté une aggravation de la phase de dilatance du mélange de sable et de déchets plastiques, caractérisée par une diminution de la pression interstitielle, lorsque la teneur en déchets augmente de 0 à 1%.

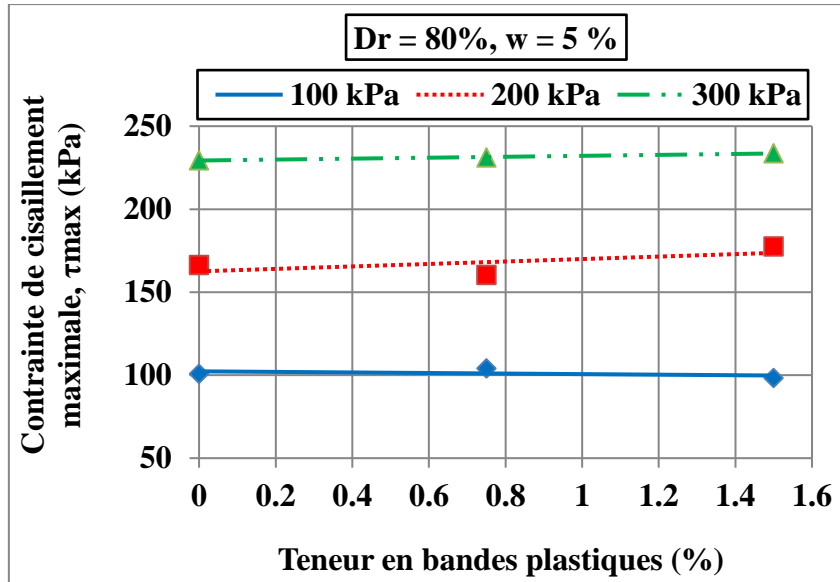


Figure 3.11 : Contrainte de cisaillement maximale, τ_{\max} (kPa) en fonction de la teneur en bandes plastiques, $D_r = 80\%$, $w = 5\%$.

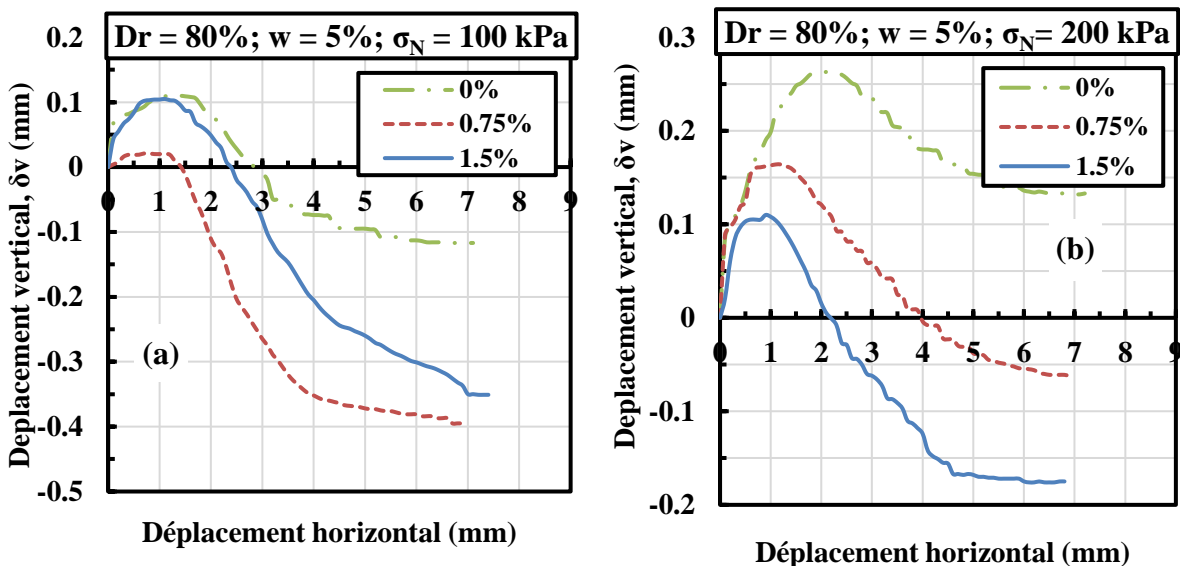


Figure 3.12 : Variation du déplacement vertical (δv) des mélanges sable-bandes plastiques en fonction du déplacement horizontal (δh), bandes plastiques, $D_r = 80\%$, $w = 5\%$.

La figure 3.13 présente les paramètres de résistance au cisaillement de mélanges de sable et de bandes plastiques préparés par dépôt humide. On observe que la cohésion du mélange diminue généralement lorsque la teneur en plastique augmente de 0 à 1,5 %. En revanche, l'angle de frottement du mélange humide contenant 1,5% de bandes de plastique est plus élevé que celui des autres échantillons, qui ont des valeurs presque similaires. En résumé, la teneur en déchets de 1,5 % s'est avérée être la teneur idéale à ajouter au sable humide pour améliorer son comportement au cisaillement sous des contraintes normales élevées, malgré la légère réduction de la cohésion du mélange qui en résulte.

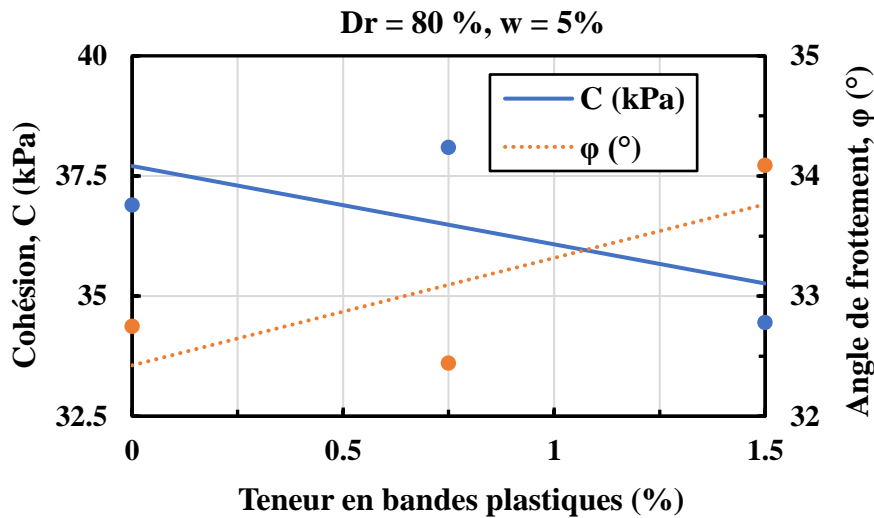


Figure 3.13 : Effet de la teneur en bandes plastiques sur les paramètres de résistance au cisaillement du sable, $Dr = 80 \%$, $w = 5\%$.

3.3 Conclusion

Ce chapitre a présenté les résultats d'essais de cisaillement direct qui ont été réalisés pour étudier le comportement au cisaillement de mélanges composés de sable et de différentes proportions de déchets plastiques PET.

Les résultats ont montré qu'à l'état dense l'addition de bandes plastiques au sable sec conduit à une augmentation de sa contrainte de cisaillement maximale, de sa cohésion et de son caractère dilatant, mais en revanche son angle de frottement reste quasiment stable. Des tendances similaires ont été obtenues dans l'état moyennement dense, sauf que le caractère dilatant et l'angle de frottement du mélange ont légèrement diminué avec l'augmentation de la teneur en déchets.

Il a également été constaté que la contrainte de cisaillement maximale, correspondant à des contraintes normales inférieures ou égales à 200 kPa, et la cohésion du sable augmentaient légèrement lorsque 1.5 % de paillettes plastiques de forme carrée y étaient ajoutés.

A l'état humide, l'augmentation de la teneur en bande plastique a entraîné une augmentation de la contrainte de cisaillement maximale correspondant à 200 et 300 kPa de contrainte normale, du caractère dilatant et de l'angle de frottement du mélange sable-plastique bien que sa cohésion ait diminué.

Ces résultats nous permettent de conclure que le comportement au cisaillement du sable peut être amélioré en y ajoutant une teneur optimale en déchets plastiques de 1,5%, mais certains effets négatifs dépendant de la densité initiale et de la forme des déchets doivent être pris en compte.

Dans le chapitre suivant, nous discuterons de l'effet de certains autres paramètres sur le comportement au cisaillement des mélanges de sable et de déchets plastiques PET.

Chapitre 4

Influence d'autres paramètres sur le comportement au cisaillement du mélange sable-plastique

4.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'analyse de l'effet de la forme des déchets plastiques, de la densité relative initiale et de la méthode de préparation des échantillons sur le comportement au cisaillement d'un mélange composé de sable et de plastique PET.

4.2 Effet de la forme des déchets plastiques

Il a été vu dans le chapitre précédent que les déchets plastiques, qu'ils soient sous forme de bandes ou de carrés, peuvent être utilisés pour améliorer le comportement au cisaillement du sable, mais avec certaines restrictions, et que la teneur optimale était de 1,5 %. Les figures 4.1 à 4.3 présentent une comparaison entre les deux formes de plastiques en termes de la manière dont elles affectent le comportement au cisaillement du sable.

Les données présentées dans la figure 4.1 montrent que les taux d'amélioration obtenus sont faibles et positifs, sauf pour le sable contenant 1,5 % de paillettes plastiques consolidés sous 300 kPa qui présente une résistance inférieure à celle du sable sans plastique. De plus, l'utilisation de bandes s'est avérée meilleure que l'utilisation de paillettes de plastique carrées pour augmenter légèrement la contrainte de cisaillement à la rupture, en particulier à faible contrainte normale de 100 kPa.

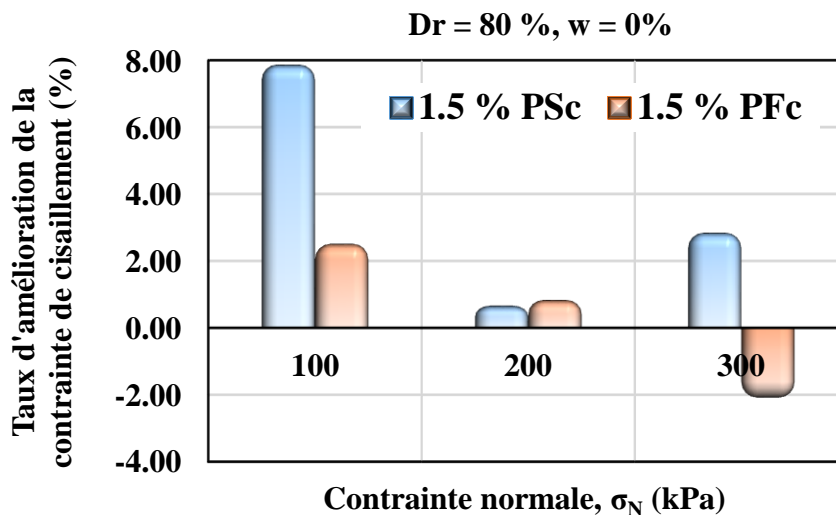


Figure 4.1 : Taux d'amélioration de la contrainte de cisaillement maximale du sable lorsque 1,5 % de plastique y est ajouté, $D_r = 80 \%$; $w = 0 \%$.

Concernant la variation du déplacement vertical, la figure 4.2 montre que tous les échantillons présentent un comportement purement dilatant. De plus, on observe que les bandes plastiques

rendent le sable plus dilatant, notamment sous une contrainte normale de 100 kPa, tandis que l'ajout de paillettes plastiques carrées au sable a peu d'effet sur sa dilatance pour les deux états de contrainte normale. D'autre part, on peut constater en analysant la figure 4.3 que les paramètres de résistance au cisaillement du sable, à savoir l'angle de frottement et la cohésion, sont légèrement améliorés lorsque 1,5 % de bandes de plastique y sont ajoutées tandis que les paillettes de plastique de forme carrée ajoutés au sable diminuent son angle de frottement.

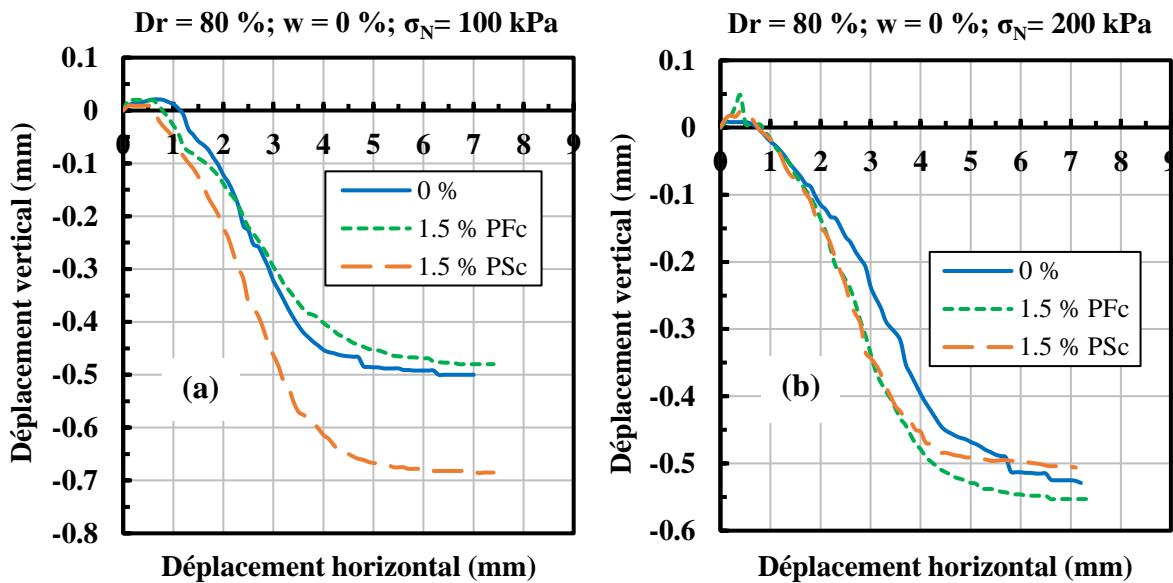


Figure 4.2 : Variation du déplacement vertical (δv) en fonction du déplacement horizontal (δh), $P_c = 0$ et 1.5 %, $D_r = 80\%$, $w = 0\%$: (a) $\sigma_N = 100$ kPa ; (b) $\sigma_N = 200$ kPa.

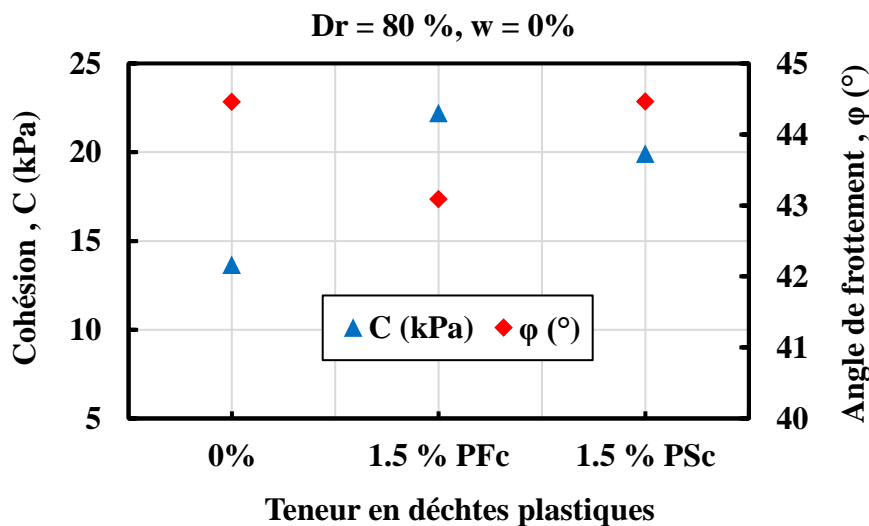


Figure 4.3 : Effet de la forme des fragments de plastique sur les paramètres de résistance au cisaillement du sable mélangé à 1.5 % de déchets plastiques, $D_r = 80\%$, $w = 0\%$.

De ce qui précède, on peut conclure que la forme en bande et celle idéale qui peut conférer au sable une légère amélioration de son comportement au cisaillement. Cela peut s'expliquer par le fait que les bandes de plastique non seulement occupent les vides, comme les paillettes de plastique, entre les particules de sable, mais elles diminuent également le volume de la matrice de sable dans le mélange, ce qui augmente le serrage entre ses particules et par la suite la liaison entre elles.

4.3 Effet de la densité relative initiale

Afin d'étudier l'effet de la densité relative initiale sur le comportement au cisaillement du mélange sable-plastique, les échantillons ont été préparés à deux états de densité différents ($D_r = 50\%$ et 80%). La figure 4.4 montre qu'après une augmentation remarquable et rapide au début de l'essai, la contrainte de cisaillement des échantillons atteint un pic, après quoi elle commence à diminuer jusqu'à atteindre un état résiduel. La chute de résistance après le pic est plus prononcée à l'état dense. De plus, on observe que les échantillons de densité moyenne présentent une valeur de τ_{max} plus faible que ceux préparés à l'état dense.

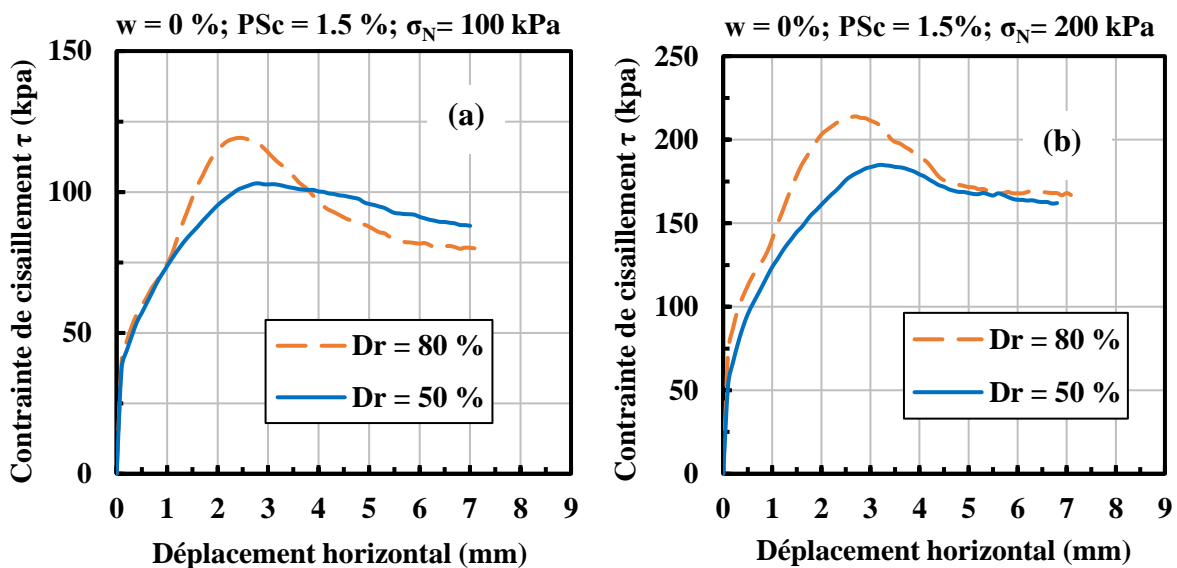


Figure 4.4 : Evolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du déplacement horizontal (δh), $w = 0\%$, $PSc = 1.5\%$: (a) $\sigma_N = 100$ kPa ; (b) $\sigma_N = 200$ kPa.

Les courbes de variation de volume présentées dans la Figure 4.5 montrent clairement que l'augmentation de la densité relative initiale conduit à la disparition de la phase de contactance où le comportement du sable contenant 1,5% de bandes plastiques devient plus dilatant quelle que soit la contrainte normale appliquée.

La figure 4.6 montre la variation des paramètres de résistance au cisaillement du sable mélangé à 1,5 % de bandes de plastique en fonction de la densité relative initiale. Il est à noter que l'angle de frottement du mélange augmente avec l'accroissement de la densité relative initiale, ce qui se traduit par une amélioration de sa résistance au cisaillement. La tendance inverse est constatée pour la cohésion du mélange.

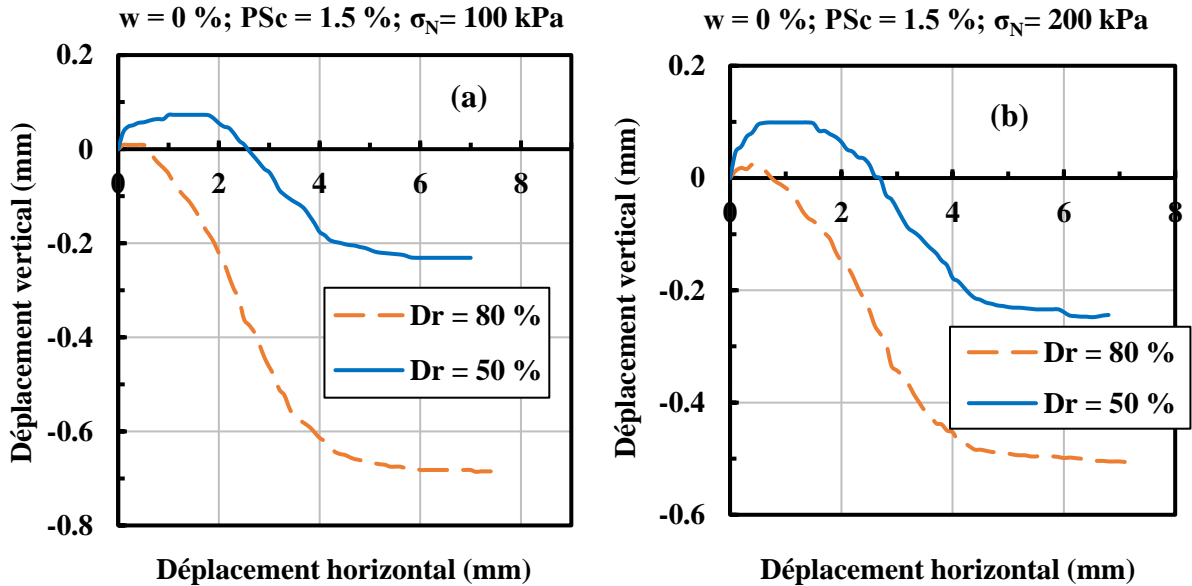


Figure 4.5 : Variation du déplacement vertical (δv) en fonction du déplacement horizontal (δh), $w = 0\%$, $PSc = 1.5\%$: (a) $\sigma_N = 100$ kPa ; (b) $\sigma_N = 200$ kPa.

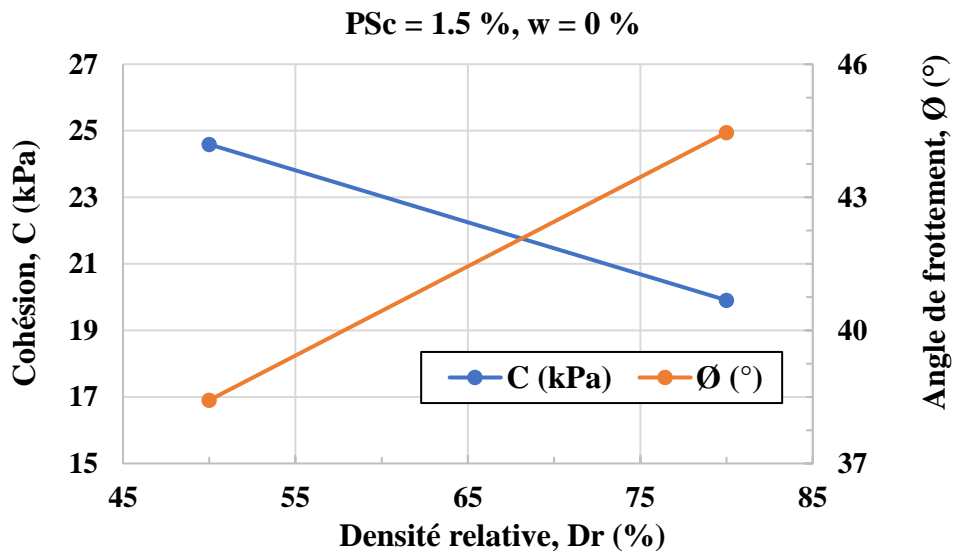


Figure 4.6 : Effet de la densité relative initiale (Dr) sur les paramètres de résistance au cisaillement du sable contenant 1,5 % de bandes plastiques.

Ces résultats nous permettent de conclure que l'augmentation de la densité relative initiale du mélange de sable et de déchets conduit à une amélioration de son comportement au cisaillement. Ceci est dû à la réduction des vides entre les particules du mélange sous l'effet du nombre de coups appliqués lors du compactage à l'état dense, ce qui augmente les surfaces de frottement entre elles. Belkhatir et al. (2014) et Flitti (2018) ont également constaté des tendances similaires.

4.4 Effet de la méthode de préparation des échantillons

Il est connu que l'étude des sols pulvérulents en laboratoire nécessite de les reconstituer pour simuler leur état initial dans la nature qui varie selon les diverses conditions de constitution. De nombreux chercheurs ont montré que la structure initiale des sols résultant de différentes méthodes de préparation affecte considérablement leur comportement mécanique, même en fixant les autres paramètres initiaux (Mulilis et al., 1977 ; Zlatović et Ishihara, 1997 ; Benahmed et al., 2004 ; Della et al., 2009 ; Sze et Yang, 2014 ; Flitti et al., 2021). Cependant, les résultats publiés ne sont pas tous d'accords.

Afin d'évaluer l'effet de la méthode de préparation des échantillons sur le comportement au cisaillement du mélange sable-plastique, deux méthodes de dépôt différentes ont été utilisées pour reconstituer les échantillons, à savoir le dépôt sec ($w = 0\%$) et le dépôt humide ($w = 5\%$). Les résultats obtenus sont présentés aux figures 4.7 à 4.11.

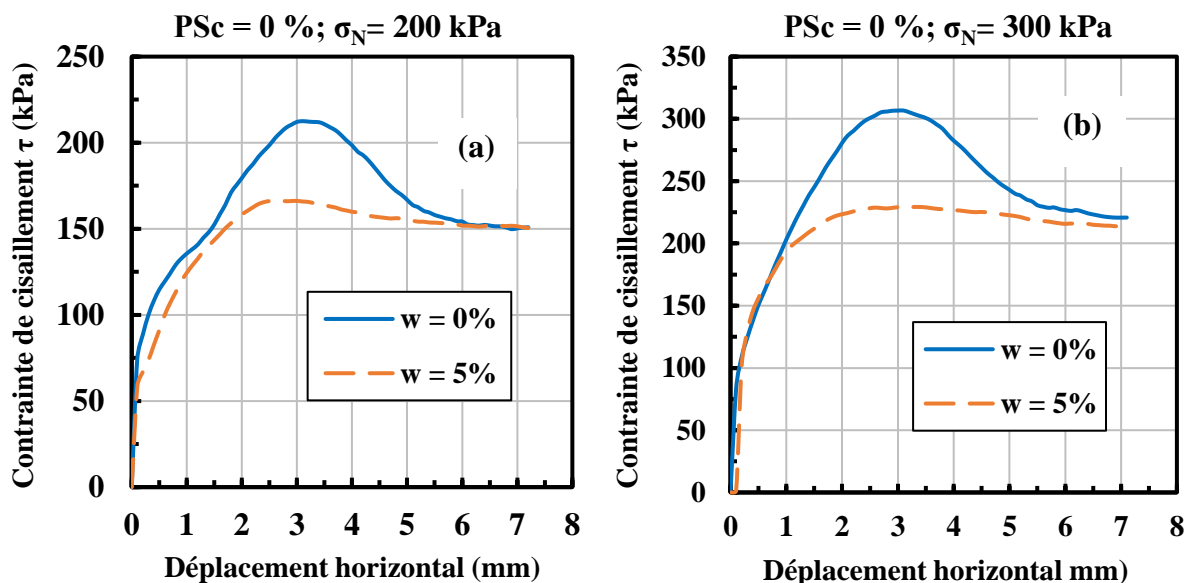


Figure 4.7 : Evolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du déplacement horizontal (δh), $PSc = 0\%$, $Dr = 70 - 80\%$: (a) $\sigma_N = 200$ kPa ; (b) $\sigma_N = 300$ kPa.

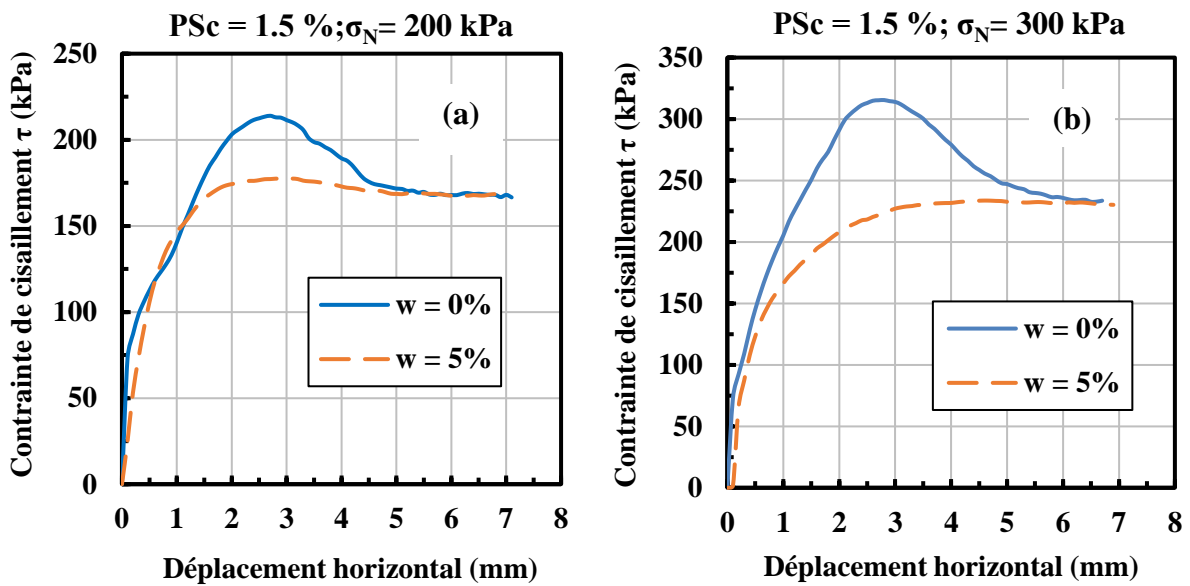


Figure 4.8 : Evolution de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du déplacement horizontal (δh), $PSc = 1.5\%$, $Dr = 70 - 80\%$: (a) $\sigma_N = 200$ kPa ; (b) $\sigma_N = 300$ kPa.

D'après la figure 4.7, on peut voir que la contrainte de cisaillement des échantillons de sable augmente considérablement au début de l'essai jusqu'à atteindre une valeur maximale, comprise entre environ 2 et 4 mm de déplacement horizontal. Après cela, une diminution remarquable de la contrainte des échantillons secs est observée par rapport à la diminution négligeable de τ des échantillons humides, mais le même état résiduel est atteint à la fin de l'essai. Il convient également de noter que la contrainte de cisaillement maximale des échantillons préparés à sec est supérieure à celle des spécimens reconstitués par le dépôt humide, et ce pour les deux contraintes normales de 200 et 300 kPa. Des tendances similaires sont observées pour le sable mélangé à 1.5 % de bandes de plastique PET (figure 4.8).

L'évolution du déplacement vertical du sable sans plastique et de celui contenant 1,5% de bandes de plastique en fonction du déplacement horizontal est illustrée respectivement dans les figures 4.9 et 4.10. On constate que les échantillons préparés par la méthode de dépôt sec et consolidés sous 300 kPa présentent, après un petit tassement au début du cisaillement, une longue phase de dilatance continue jusqu'à la fin de l'essai, alors que les éprouvettes consolidées sous 200 kPa ont un comportement purement dilatant. En revanche, l'addition d'une teneur en eau de 5% au mélange sable-plastiques favorise son caractère contractant au détriment de sa dilatance.

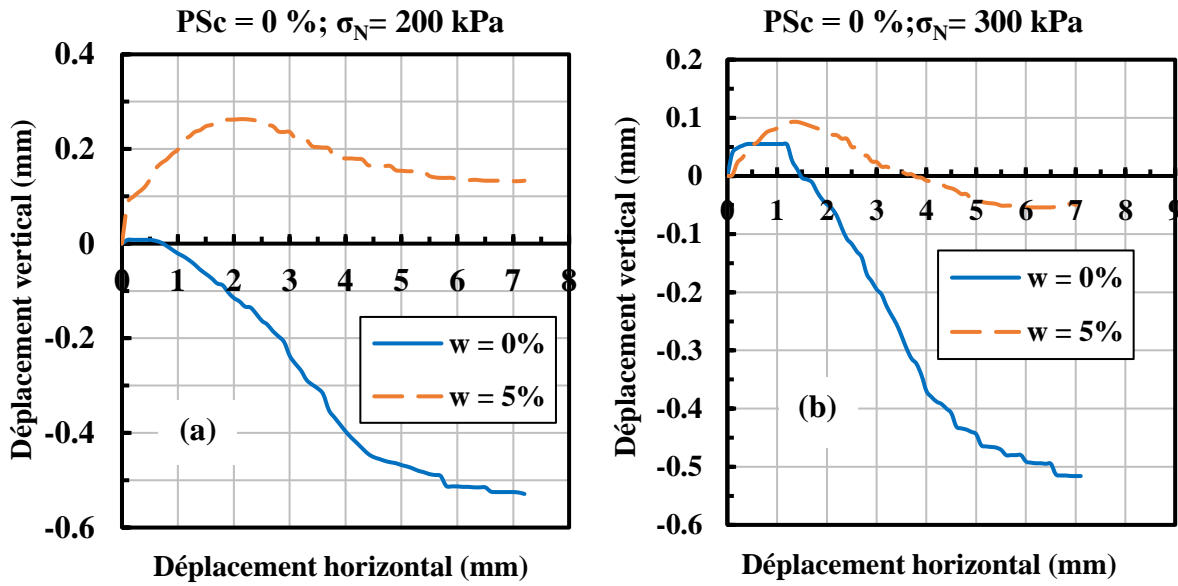


Figure 4.9 : Variation du déplacement vertical (δv) en fonction du déplacement horizontal (δh), $PSc = 0\%$, $Dr = 70 - 80\%$: (a) $\sigma_N = 200$ kPa ; (b) $\sigma_N = 300$ kPa.

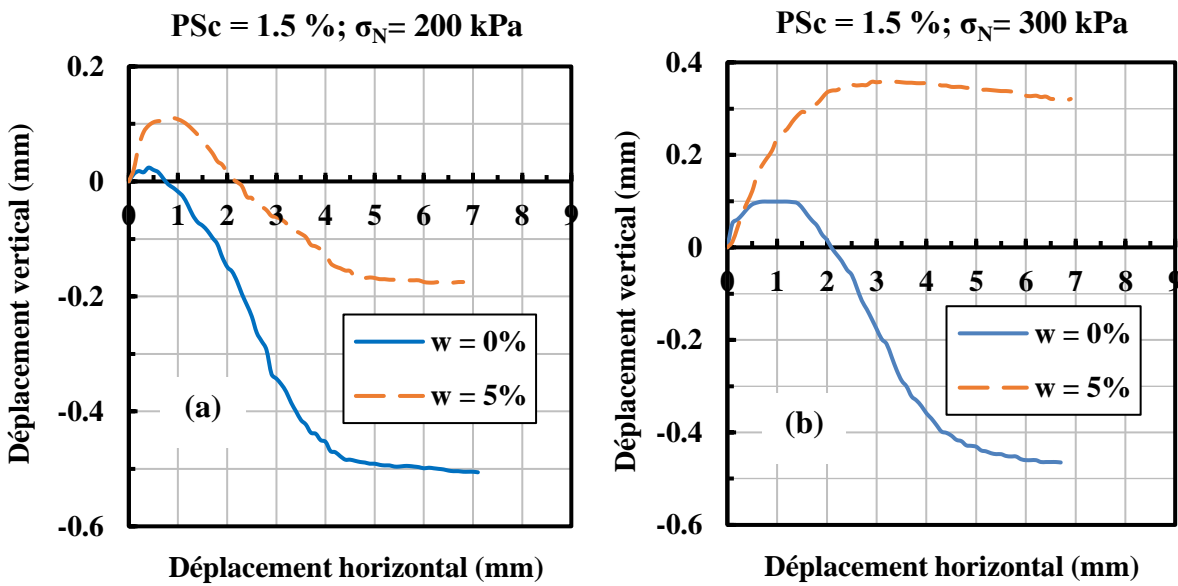


Figure 4.10 : Variation du déplacement vertical (δv) en fonction du déplacement horizontal (δh), $PSc = 1.5\%$, $Dr = 70 - 80\%$: (a) $\sigma_N = 200$ kPa ; (b) $\sigma_N = 300$ kPa.

La figure 4.11 montre que l'échantillon de sable exempt de plastique et celui mélangé à 1,5 % de bandes plastiques préparés par la méthode sèche ont une cohésion plus faible que celle des échantillons humides, tandis que la tendance inverse est observée pour l'angle de frottement où il diminue avec l'ajout d'une teneur en eau initiale que ce soit en présence de plastique ou non.

De ce qui précède, on peut conclure que les échantillons préparés par dépôt sec sont plus résistants et plus dilatants que ceux reconstitués par dépôt humide. Des tendances similaires ont été obtenues par [Canou \(1989\)](#), [Benahmed et al. \(2004\)](#), [Della et al. \(2009\)](#), et [Flitti et al. \(2021\)](#). Ce résultat s'explique par le fait que le dépôt humide favorise la création de pores de grande taille dans la structure des échantillons, ce qui conduit généralement à une réduction de volume lors du cisaillement. En revanche, les échantillons préparés par le dépôt sec possèdent une structure plus stable sans macroporosité, bien que l'indice des vides initiale soit le même ([Benahmed, 2001](#) ; [Benahmed et al. 2004](#) ; [Flitti, 2018](#)).

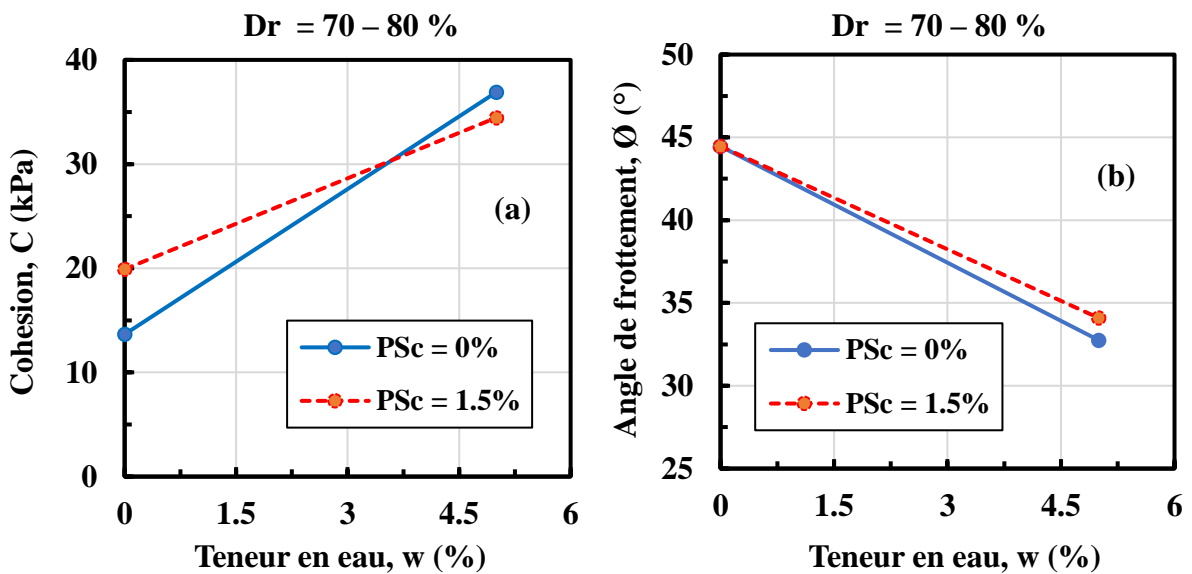


Figure 4.11 : Effet de la méthode de préparation des échantillons sur les paramètres de résistance au cisaillement, PSc = 0% et 1.5%, Dr = 70 – 80 % : (a) C vs w ; (b) Ø vs w.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'effet de la forme des déchets plastiques PET, de la densité relative et de la méthode de préparation des échantillons sur le comportement au cisaillement des mélanges sable-plastique (0% et 1.5%).

Les résultats ont montré que le plastique en forme de bande était meilleur que celui en forme de carré en termes d'amélioration de la résistance au cisaillement du sable, bien que cette amélioration soit quelque peu faible.

Il a également été constaté que l'augmentation de la densité relative initiale du mélange sable-plastique améliore son comportement au cisaillement et que les mélanges préparés par la méthode sèche sont plus résistants et plus dilatants que ceux préparés par la méthode humide.

CONCLUSION GENERALE

L'étude présentée a été réalisée pour évaluer expérimentalement le comportement au cisaillement d'un sol sableux mélangé à des déchets plastiques, en se concentrant sur l'effet de la teneur en déchets, de la forme des déchets et d'autres paramètres. Pour atteindre cet objectif, différents essais de cisaillement direct à la boîte ont été réalisés sur trois mélanges différents de sable et de plastique (0 %, 0.75 % et 1.5 %). Les mélanges denses ont été reconstitués par deux méthodes de préparation différentes, à savoir la méthode de dépôt sec et humide, tandis que les mélanges de densité moyenne ont été préparés uniquement par la méthode sèche, et chaque mélange a été testé sous trois contraintes normales ($\sigma_N = 100, 200$ et 300 kPa).

Les résultats ont montré qu'à l'état dense, l'ajout de 1,5 % de bandes plastiques au sable sec améliorait légèrement son comportement au cisaillement en termes de contrainte de cisaillement maximale, de cohésion et de caractère dilatant. A densité moyenne, des tendances positives ont également été obtenues, à l'exception d'une légère réduction de l'angle de frottement du sable et de son caractère dilatant constatée lorsque des déchets y ont été ajoutés.

Lorsqu'une teneur initiale en eau a été utilisée pour préparer les mélanges sable-plastique, une augmentation de l'angle de frottement du mélange et de son caractère dilatant a été observée avec l'augmentation de la teneur en bandes plastiques, bien que sa cohésion ait diminué, et la teneur optimale en déchets était de 1,5 %.

En utilisant la même teneur optimale en déchets de 1,5 %, il a été constaté que les bandes plastiques amélioraient le comportement au cisaillement du sable mieux que les paillettes plastiques de forme carrée, bien que l'amélioration soit quelque peu faible.

Il a également été constaté que le comportement au cisaillement du mélange sable-plastique s'améliore avec l'accroissement de sa densité relative initiale et que les mélanges reconstitués par la méthode de dépôt à sec sont plus résistants et plus dilatants que ceux préparés par la méthode de dépôt humide.

A l'issue de cette étude, et afin de confirmer les résultats obtenus, il est recommandé à tous ceux qui souhaitent poursuivre dans cet axe de recherche d'exécuter des études approfondies en utilisant une boîte de cisaillement à grande échelle et l'appareil triaxial, tout en élargissant le champ d'étude à d'autres teneurs et formes de déchets plastiques.

REFERENCES

- Acharyya, R., Lahiri, A., Mukherjee, S. P., & Raghu, P. V. (2013, December). Improvement of undrained shear strength of clayey soil with PET bottle strips. In *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, December 22-24, Roorkee, India* (pp.1-8).
- Agence Nationale des Déchets (2019). *Caractérisation des déchets ménagers et assimilés (campagne nationale 2018 / 2019)*. 1-27.
- Agence Nationale des Déchets (2020a). *Rapport sur l'état de la gestion des déchets en Algérie*. 1-150.
- Agence Nationale des Déchets (2020b). *Les déchets plastiques en Algérie : regard croisé sur les plastiques à usage unique*. 1-23.
- Al-Haddad, S. A., Al-Ani, F. H., & Fattah, M. Y. (2022). Effect of using plastic waste bottles on soil response above buried pipes under static loads. *Applied Sciences*, 12(23), 12304.
- Arab, A. (2009). Comportement monotone et cyclique d'un sable limoneux. *Comptes Rendus Mécanique*, 337(8), 621-631.
- Babu, G.L. S., & Chouksey, S. K. (2011). Stress–strain response of plastic waste mixed soil. *Waste management*, 31(3), 481-488.
- 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.
- Bell, A., & Kirsch, K. (2012). Introduction and background. In K. Kirsch, & A. Bell (Eds.), *Ground Improvement* (3th ed., pp. 1–15). CRC Press.
- Benahmed, N. (2001). *Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique : application aux phénomènes de liquéfaction et de mobilité cyclique* (Doctoral dissertation, Marne-la-vallée, ENPC).
- Benahmed, N., Canou, J., & Dupla, J. C. (2004). Structure initiale et propriétés de liquéfaction statique d'un sable. *Comptes rendus mécanique*, 332(11), 887-894.
- Benson, C. H., & Khire, M. V. (1994). Reinforcing sand with strips of reclaimed high-density polyethylene. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(5), 838-855.

- Botero, E., Ossa, A., Sherwell, G., & Ovando-Shelley, E. (2015). Stress–strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET). *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4), 363-369.
- Canou, J. (1989). *Contribution à l'étude et à l'évaluation des propriétés de liquéfaction d'un sable* (Doctoral dissertation, Marne-la-vallée, ENPC).
- Chmielewska, I., & Gosk, W. (2022). Sustainable soil stabilization: the use of waste materials to improve the engineering properties of soft soils. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych*, (3), 34-41.
- Choudhary, A. K., Jha, J. N., & Gill, K. S. (2010). A study on CBR behavior of waste plastic strip reinforced soil. *Emirates journal for engineering research*, 15(1), 51-57.
- Chu, J., Varaksin, S., Klotz, U., & Mengé, P. (2009). Construction processes. In *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Volumes 1, 2, 3 and 4)* (pp. 3006-3135). IOS Press.
- Consoli, N. C., Montardo, J. P., Prietto, P. D. M., & Pasa, G. S. (2002). Engineering behavior of a sand reinforced with plastic waste. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 128(6), 462-472.
- Della, N., Arab, A., & Belkhatir, M. (2011). Drained and undrained shear strength of silty sand: effect of the reconstruction methods and other parameters. *Geologia Croatica*, 64(2), 163-171.
- Della, N., Arab, A., Belkhatir, M., & Missoum, H. (2009). Identification of the behavior of the Chlef sand to static liquefaction. *Comptes rendus. Mécanique*, 337(5), 282-290.
- Della, N., Belkhatir, M., Arab, A., Canou, J., & Dupla, J. C. (2014). Effect of fabric method on instability behavior of granular material. *Acta Mechanica*, 225(7), 2043-2057.
- Dutta, R. K., & Venkatappa Rao, G. (2004, October). Engineering properties of sand reinforced with strips from waste plastic. In *Proceedings of the international conference on geotechnical engineering, Sharjah, UAE* (pp. 186-193).
- Dutta, R., & Sarda, V. (2008). A comparative study of compaction and CBR behaviour of stone dust reinforced with waste plastic strips. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2(3), 255-264.

- Dutta, S., & Mandal, J. N. (2013, October). Feasibility study on waste plastic water bottles as encasements of stone columns for ground improvement. In *Int. Symp. on Design and Practice of Geosynthetic-Reinforced Soil Structures, Univ. of Bologna, Bologna, Italy* (pp. 379-388).
- Flitti, A. (2018). *Contribution à l'étude du comportement mécanique et hydraulique du sol de la région de Chlef* (Doctoral dissertation, université de Chlef).
- Flitti, A., Della, N., De Kock, T., Cnudde, V., & Verástegui-Flores, R. D. (2021). Effect of initial fabric on the undrained response of clean Chlef sand. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 25(13), 2441-2456.
- Haider, A. B., Iravanian, A., Selman, M. H., & Ekinci, A. (2023). Using waste PET shreds for soil stabilization: efficiency and durability assessment. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 9(4), 48.
- Hassan, H. J. A., Rasul, J., & Samin, M. (2021). Effects of plastic waste materials on geotechnical properties of clayey soil. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 8(3), 390-413.
- Hassan, H. J. A., Rasul, J., & Samin, M. (2021). Effects of plastic waste materials on geotechnical properties of clayey soil. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 8(3), 390-413.
- Karmacharya, R., & Acharya, I. P. (2017, December). Reinforcement of soil using recycled polyethylene terephthalate (PET) bottle strips. In *Proceedings of IOE Graduate Conference* (Vol. 5, pp. 153-156).
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil mechanics*, 553 pp.
- Ministère français de l'aménagement du territoire et de la décentralisation logement, transports, ruralité, ville (2024, décembre 30). *Différentes catégories de déchets*. [ecologie.gouv.fr. https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/differentes-categories-dechets#la-notion-de-sous-produit-3](https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/differentes-categories-dechets#la-notion-de-sous-produit-3)
- Mulilis, J. P., Seed, H. B., Chan, C. K., Mitchell, J. K., & Arulanandan, K. (1977). Effects of sample preparation on sand liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(2), 91-108.

- NF, P. 94-071-1. (1994). Sols : Reconnaissance et essais - essai de cisaillement rectiligne à la boîte - Partie 1 : Cisaillement direct. *Editions AFNOR Boutique, Saint-Denis, France.*
- Niyomukiza, J. B., Bitekateko, A., Nsemerirwe, J., Kawiso, B., & Kiwanuka, M. (2021, November). Investigating the effect of PET plastic bottle strips on the strength and compressibility properties of clayey soil. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 894, No. 1, 012021). IOP Publishing.
- Peddaiah, S., Burman, A., & Sreedeeep, S. (2018). Experimental study on effect of waste plastic bottle strips in soil improvement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, 2907-2920.
- Singh, J., Sonthwal, V., & Rattan, J. (2017). Review on improvement of engineering properties of soil using waste plastic bottles strips (Polyethylene terephthalate). *International Journal on Emerging Technologies*, 8(1), 1-4.
- Sze, H. Y., & Yang, J. (2014). Failure modes of sand in undrained cyclic loading: impact of sample preparation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 140(1), 152-169.
- Ustohalova, V. (2011). Management and export of wastes: human health implications. *Encyclopedia of Environmental Health*, 2nd edition, Volume 4, 219-288, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63951-6.00573-8>.
- Wypych, G. (2016). PET poly(ethylene terephthalate). In G. Wypych (Eds.), *Handbook of Polymers* (Second Edition, p. 398-403). ChemTec Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-92-8.50122-1>.
- Zlatovic, S., & Ishihara, K. (1997). Normalized behavior of very loose non-plastic soils: effects of fabric. *Soils and foundations*, 37(4), 47-56.