



**Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE

**Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER**

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Structure

THEME

**CARACTERISATION D'UN SOL
SABLEUX CONTENANT DES FIBRES
CAOUTCHOUTEUSES**

Dirigé par :

Dr. MEDDAH Abdelaziz

Présenté par :

MERZOUG Karima

Promotion : 2015/2016.

REMERCIEMENT

Je remercie en premier mon DIEU pour tout.

Je remercie en second mes parents, qui ont sacrifiés leur vie pour notre bien.

Nous tenons à remercier nos promoteurs Mr MEDDAH Abdelaziz, pour le suivi,

les conseils et les encouragements qu'il nous a attribués.

Je remercie également les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon travail

Spécial merci aux mes sœurs Djamilia Bariza et mon frère Fateh

Pour leur aide et patience.

Et je remercie mes copines Hadjer et Ardjouna sur tous.

Tous qui m'ont bien aidé pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier tous les enseignants du département Génie Civil.

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mes chers parents

A mes sœurs

A mes frères

A ma copine intime Hadjer

A mes collègues de promotion

Et à tous personnes ayant contribués à ce travail de près ou de loin.

MERZOUG .K

ملخص

في هذه الدراسة، يقترح طريقة بديلة وصديقة للبيئة لتعزيز التربة الغير متماسكة. هذه التقنية تعتمد على استخدام النفايات المطاطية بشكل ألياف موزعة عشوائيا في رمال الكثبان. أضيفت الألياف المطاطية للرمال بنسب مختلفة: 0,25 - 0,5 - 0,75-1-1,25-1,5-1,75-2% ويتم التعبير عن هذه النسب نسبة إلى الوزن الجاف من الرمل. يقوم البرنامج التجريبي على دراسة تأثير الألياف المطاطية على خصائص قوة القص للرمال. بالإضافة إلى الفوائد البيئية من النهج المقترح في هذه الدراسة، إنشاء تطبيق جديد يسمح باستيعاب كمية من النفايات المطاطية، فقد بينت النتائج أن إدراج الألياف المطاطية في التربة الرملية يحسن من قوة القص ويجعل الرمل أكثر مرونة.

الكلمات المفتاحية: تعزيز التربة الغير متماسكة, الألياف المطاطية, التربة الرملية, مقاومة القص.

Résumé

Dans cette étude, une méthode environnementale pour le renforcement des sols pulvérulents est proposée. Cette technique consiste en l'utilisation des déchets caoutchouteux sous forme de fibres aléatoirement distribuées dans un sable de dunes. Ces fibres ont été incorporées dans le sable en différents pourcentages: 0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25, 1.5, 1.75 et 2%. Ces pourcentages sont exprimés par rapport à la masse sèche du sable. Le programme expérimental entrepris consiste à étudier l'effet des fibres caoutchouteuses sur les caractéristiques de résistance du sable. En plus de l'avantage environnemental de l'approche proposée dans cette étude, la création d'une nouvelle application qui permette d'absorber une quantité de déchets caoutchouteux, les résultats obtenus montrent que l'inclusion de fibres en caoutchouc dans un sol sableux permet d'améliorer la résistance au cisaillement et d'apporter plus de ductilité au sable.

Mots clés: Renforcement des sols pulvérulents, fibres caoutchouteuses, sol sableux, résistance au cisaillement,

Abstract

In this study, an alternative and environmentally friendly method for the reinforcement of sandy soils is proposed. This technique consist using randomly distributed rubber fibers for improving the engineering properties of sand. The rubber fibers were added to the sand with different percentages: 0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25; 1.5; 1.75 and 2%. These rates are calculated as percentages of the dry weight of sand. The experimental program carried out on reinforced sand is consisted to investigate the effect of the incorporated rubberized fibers on the shear strength properties of sand. In addition to the environmental advantages of the approach proposed in this study, creating a new application for valorizing of rubber waste, the obtained results show that the inclusion of rubber fibers in sandy soil allowed improving the mechanical properties of sand and making more ductile behavior of sand.

Keywords: Reinforcement of sandy soils, the rubber fibers, sand, mechanical properties.

SOMMAIRE

I. Introduction générale	1
--------------------------------	---

CHAPITRE I

RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

I.1. Introduction.....	3
I.2. Etude en laboratoire de la rupture des sols	3
I.2.1. Essai de cisaillement direct à la boîte	3
I.2.1.1. description de l'essai	3
I.2.1.2. Avantages et inconvénients de l'essai de cisaillement	4
I.2.2. Essais à l'appareil triaxial	5
I.2.2.1. description	5
I.2.2.2. Types d'essais de triaxiale	6
I.3. Résistance au cisaillement du sol.....	6
I.3.1. Généralités	6
I.3.2. Facteurs influant les paramètres de la résistance au cisaillement	8
I.3.3. Comportement drainé et non drainé d'un sol.....	8
I.3.3.1. Comportement drainé.....	8
I.3.3.2. Comportement non drainé.....	9
I.4. Conclusion.	9

CHAPITRE II

LES DECHETS CAOUTCHOUTEUX

II.1. Introduction :	10
II.2. Historique du caoutchouc	10
II.3. Définition et types du caoutchouc	10

II.3.1. Le caoutchouc naturel	11
II.3.2. Le caoutchouc synthétique	11
II.4. Propriétés du caoutchouc	12
II.4.1. Elasticité	12
II.4.2. Etanchéité	13
II.4.3. Amortissement.....	13
II.5. Filières de valorisation	13
II.5.1. La valorisation des matières premières	13
II.5.2. Réhabilitation de carrière	14
II.5.3. La valorisation originale "La technique Pneusol"	15
II.5.3.1. Avantages de la technique de Pneusol	16
II.5.3.2. L'intérêt de la technique du Pneusol	16
II.6. Emploi de caoutchouc en génie civil	16
II.6.1. Granulats	16
II.6.2. Renforcement des sols	18
II.6.2.1. Remblais allégés et absorbeurs d'énergie.....	18
II.6.2.2. Pneusol de soutènement	19
II.7. Quelques ouvrages par la technique pneusol en Algérie.....	20
II.8. Autres utilisations du caoutchouc	21
II.9. Conclusion.....	21

CHAPITRE III

MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

III.1. Introduction	22
III.2. Localisation du site prélèvement.....	22
III.3. Caractérisation du sable	22
III.3.1. La masse volumique	22

III.3.1.1. La masse volumique apparente	22
III.3.1.2. La masse volumique absolue	25
III.3.2. Analyse granulométrique par tamisage	26
III.3.3. Equivalent de sable	29
III.4. Fibres de caoutchouc	31
III.5. Dispositif expérimentale et procédure d'essais	33
III.5.1. L'essai à la boîte de cisaillement	33
III.5.2. Principe de l'essai de cisaillement	33
III.5.3. Appareillage	34
III.5.4. Procédure d'essais	35
III.6. Préparation des mélanges	35
III.7. programme expérimental execute	35

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. Introduction	38
IV.2. Présentation des résultats	38
IV.2.1. Effet des fibres caoutchouteuses sur la résistance au cisaillemen	38
IV.2.2. Effet de la densité sur la résistance de cisaillement	43
IV.2.3. Effet des fibres caoutchouteuses sur l'angle de frottement interne	44
Conclusion générale	47

LISTE DES FIGURES

Figure (I.1): Schéma de principe de l'essai de cisaillement à la boîte	4
Figure (I.2): Schéma de principe d'un appareil d'essai triaxial.	6
Figure (II.1): Latex naturel	11
Figure (II.2): Réhabilitation de carrière par l'utilisation de pneus usagés, [Alia pur 08].	15
Figure (II.3): Le chantier Cannes-Mandelieu en 1988 avec la technique de Pneusol®.....	16
Figure (II.4): Absorbeur d'ondes sismiques	19
Figure (II.5) :Protection de chute de blocs.....	19
Figure (II.6) : Ouvrage en pneus anti-érosion	19
Figure (II.7) : Renforcement d'un talus de la ville de Bou-Smail.....	20
Figure (III.1):Localisation du site de prélèvement.....	22
Figure (III.2) :L'essai de la masse volumique apparente	24
Figure (III.3) : Série de tamis et tamiseuse électrique.....	27
Figure (III.4) : Courbe granulométrique du sable des dunes.....	29
Figure (III.5) : Agiter dans l'agitateur 30s	30
Figure (III.6) : Après l'agitation laisser reposer 20mn.....	30
Figure (III.7) : Fibres de caoutchouc utilisées.....	32
Figure (III.8) : Boite de CASAGRANDE.....	34
Figure (III.9): Aspect du sable renforcé au caoutchouc.....	36
Figure (IV.1): Effet du caoutchouc sur la résistance au cisaillement à l'état lâche ($\sigma_n=100\text{KPa}$).	38
Figure (IV.2): Effet du caoutchouc sur la résistance au cisaillement à l'état lâche ($\sigma_n=200\text{KPa}$)	38
Figure (IV.3): Effet du caoutchouc sur la résistance au cisaillement à l'état lâche ($\sigma_n=400\text{KPa}$)	39
Figure (IV.4): Effet du caoutchouc sur la résistance au cisaillement à l'état dense ($\sigma_n=100\text{KPa}$).	39

Figure (IV.5): Effet du caoutchouc sur la résistance au cisaillement à l'état dense ($\sigma_n=200\text{KPa}$)	40
Figure (IV.6): Effet du caoutchouc sur la résistance au cisaillement à l'état dense ($\sigma_n=400\text{KPa}$)	40
Figure (IV.7) : Effet de la densité sur la résistance au cisaillement ($\sigma_n=100\text{KPa}$).....	43
Figure (IV.8) : Effet de la densité sur la résistance au cisaillement ($\sigma_n=200\text{KPa}$).....	43
Figure (IV.9) : Effet de la densité sur la résistance au cisaillement ($\sigma_n=400\text{KPa}$).....	44
Figure (IV.10) : Courbe intrinsèque du sable des dunes à l'état lâche.....	45
Figure (IV.11): Evolution d'angle de frottement en fonction des fibres caoutchouteuses	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (II.1) : Exemple de valorisation matière.	14
Tableau (II.2) : Chute de résistance en compression obtenues par Topçu (1995).....	18
Tableau (III.1) : La masse volumique apparente à l'état lâche.....	24
Tableau (III.2) : La masse volumique apparente à l'état compact.....	25
Tableau (III.3) : La masse volumique absolue du sable de dune.....	26
Tableau (III.4) : Résultats d'analyse granulométrique de sable des dunes.....	28
Tableau (III.5) : Equivalent de sable visuel.....	31
Tableau (III.6) : Equivalent de sable par piston.....	31
Tableau (III.7) : La masse volumique absolue du caoutchouc.....	33
Tableau (III.8) : Quantité de fibres utilisées.....	36
Tableau (III.9) : Programme d'essais de cisaillement exécuté.....	37
Tableau (IV.1) : Les résultats d'essais de cisaillement.....	42
Tableau (IV.2) : La variation d'angle de frottement de sable des dunes.....	46

INTRODUCTION GENERALE

L'une des principales activités des ingénieurs de Génie Civil est la stabilisation des sols. Ce terme rassemble un ensemble de techniques qui ont pour but d'améliorer la résistance des sols et/ou de limiter les déformations sous des ouvrages existants. Par ailleurs, le renforcement des sols de fondations ou de remblais consiste en l'amélioration de la résistance vis à vis du cisaillement. En géotechnique, plusieurs techniques ont été utilisées pour stabiliser le sol. Ces techniques sont basées parfois sur des approches chimiques, par l'addition des matériaux cimentaires (ciment, chaux, cendres volantes, laitier, etc.) ou sur des approches purement mécaniques par l'association d'éléments rigides au sol (terre armée). Cependant, le choix entre ces méthodes dépend du type du sol et la nature du projet.

Le développement des activités industrielles envisagé dans nos jours est accompagné par des graves problèmes environnementaux, car les différentes étapes de fabrication de produits génèrent des déchets de diverses natures. En effet, la valorisation des déchets industriels dans les applications du génie civil est une préoccupation majeure pour les ingénieurs et les chercheurs. Par ailleurs, l'utilisation des différents déchets industriels dans le domaine de génie civil, qui est un grand consommateur de ressources naturels, permet non seulement de réduire le cout mais également de protéger l'environnement et parfois d'améliorer certaines caractéristiques techniques du sol ou du béton telles que la résistance, l'étanchéité, la ductilité, etc.

Les déchets caoutchouteux sont considérés comme encombrants et non respectueux de l'environnement. L'industrie automobile est une activité qui consomme un volume important de caoutchouc et par conséquent elle est la source principale des déchets de caoutchouc. Il convient donc indispensable, avec l'accroissement continu du nombre de véhicules dans le monde, de trouver des applications innovantes pour absorber une quantité de ces déchets.

Cette étude est inscrite dans le cadre d'un programme de recherche qui a pour but de développer de nouvelles applications de Génie Civil permettant d'absorber une quantité de déchets caoutchouteux. De ce fait, ce travail porte sur la caractérisation d'un sable dunaire (sable de Boussaâda) contenant des déchets caoutchouteux sous forme de fibres. L'étude présente, en effet, des avantages majeurs sur les plans technique et environnemental. Le protocole expérimental suivi consiste en l'étude de l'effet des fibres en caoutchouc sur les caractéristiques de résistance du sable. Les fibres en caoutchouc ont été ajoutées au sable en différents

pourcentages 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1.75 et 2%. Ces pourcentages sont calculés par rapport à la masse du sable à l'état sec.

Le mémoire comporte deux parties, une partie théorique dans laquelle les principes fondamentaux de comportement des sols sableux ont été présentés. De plus, un état de l'art sur les déchets caoutchouteux et ses applications en génie Civil, a été présenté. Dans la partie expérimentale, nous avons présenté et discuté les résultats d'essais de cisaillement à la boîte du sable renforcé de fibres.

Pour arriver aux objectifs de l'étude, nous avons structuré le mémoire en quatre chapitres;

- Introduction.
- chapitre I: Résistance au cisaillement des sols.
- chapitre II: Les déchets caoutchouteux.
- chapitre III: Matériaux et procédures expérimentales.
- chapitre IV: Résultats et discussions.
- Conclusion générale.

Chapitre I
Résistance au
cisaillement
des sols

I.1. INTRODUCTION

Le dimensionnement des ouvrages géotechniques nécessite la connaissance de comportement du sol aux petites déformations et à la rupture, pour assurer la stabilité de ces ouvrages sous les charges qu'ils auront à supporter. En effet, avant de concevoir les murs de soutènements ou les fondations de structures, il faudra définir les propriétés mécaniques du sol pour que les charges qui y seront appliquées ne provoquent pas des déformations excessives ou de la rupture. La résistance des sols se détermine en laboratoire à l'aide de l'essai à la boîte de cisaillement (cisaillement direct) ou de l'essai à l'appareil triaxial.

Ce chapitre représente une synthèse bibliographique sur la résistance au cisaillement des sols sableux et les mécanismes fondamentaux qui gèrent leur comportement.

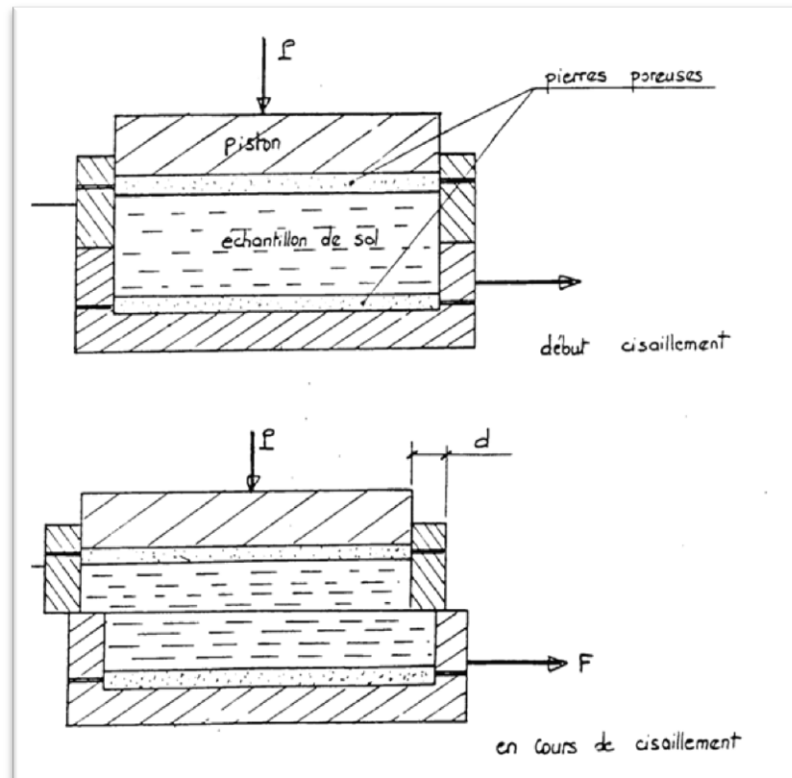
I.2. ETUDE EN LABORATOIRE DE LA RUPTURE DES SOLS

I.2.1. Essais de cisaillement direct à la boîte

I.2.1.1. Description de l'essai

Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante. L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne φ et sa cohésion C (dans notre cas la cohésion est nulle). Ces valeurs servent entre autre à déterminer la contrainte admissible par le sol dans le cas de fondations superficielles et la poussée du sol sur un mur de soutènement.

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux-demi boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un piston d'exercer sur le sol une contrainte normale σ déterminée. La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement F est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure. Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon. L'échantillon subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan imposé sur lequel on exerce une contrainte normale déterminée.



Figure(I.1): schéma de principe de l'essai de cisaillement à la boîte

I.2.1.2 Avantages et inconvénients de l'essai de cisaillement

▮ *Avantage :*

- simple
- rapide
- économique (peu coûteux)

▮ *Inconvénients :*

- Les conditions de drainage ne sont pas maîtrisées :
 - i. Pour les sols pulvérulents : le drainage est rapide, et les contraintes appliquées sont des contraintes effectives.
 - ii. Pour les sols fins :
 - ✓ Si le cisaillement est rapide: contraintes totales et comportement à court terme.
 - ✓ Si le cisaillement est lent ($\mu\text{m}/\text{min}$): contraintes effectives et comportement à long terme.
- La surface de l'échantillon, soumise aux efforts de cisaillement, varie au cours de l'essai sous l'effet du déplacement relatif des deux demi-boîtes.

- La répartition des contraintes sur le plan de cisaillement n'est pas uniforme; la contrainte de cisaillement est maximale au centre de l'échantillon et décroît pour s'annuler vers les bords.
- La répartition de la pression verticale est commandée par les légers mouvements du piston qui ont souvent tendance à basculer.

La boîte de Casagrande, malgré ces imperfections, est la plus utilisée dans la pratique courante.

I.2.2. Essais à l'appareil triaxial

I.2.2.1. Description

L'essai est réalisé sur des éprouvettes cylindriques de sol saturé. L'éprouvette est placée dans une cellule cylindrique remplie d'eau. La surface latérale de l'éprouvette est protégée par une gaine élastique étanche. Des pierres poreuses saturées placées aux extrémités de l'éprouvette peuvent être mises en communication avec l'extérieur de la cellule afin d'assurer le drainage en cours d'essai. Elles peuvent également être reliées à un appareil de mesure de la pression interstitielle.

La cellule est remplie d'eau. Le dispositif d'essai permet de mettre cette eau en pression et ainsi d'appliquer à l'éprouvette une contrainte isotrope. Par ailleurs, l'éprouvette peut être comprimée verticalement à l'aide d'un piston. Soit F la force ainsi appliquée. La déformation verticale correspondante δ est mesurée à l'aide d'un capteur de déplacement.

Un robinet permet, s'il est ouvert, le drainage de l'éprouvette par l'intermédiaire des disques drainants : l'essai est dit drainé. S'il est fermé, le sol ne peut pas se drainer : l'essai est non drainé.

La mesure de la pression interstitielle impose une saturation parfaite. La saturation du dispositif est réalisée par la méthode de la contre pression : application simultanée d'une pression interstitielle et d'une contrainte totale isotrope qui restent constantes pendant tout l'essai.

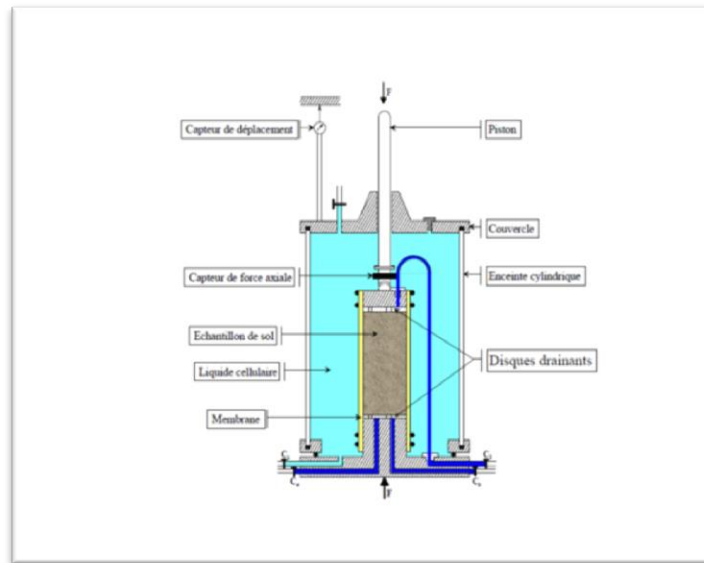


Figure (I.2): Schéma de principe d'un appareil d'essai triaxial.

I.2.3. Types d'essais de triaxiale

Il existe 3 types d'essais de triaxiale, à choisir en fonction du chantier et des données nécessaires à l'étude géotechnique :

- L'essai non consolidé non drainé (UU) afin de déterminer des caractéristiques à court terme.
- L'essai consolidé non drainé avec mesure de la pression interstitielle (CU) pour des caractéristiques à long terme.
- L'essai consolidé drainé (CD), reproduit parfaitement les conditions géostatiques du sol in situ et assure un contrôle du comportement du sol de manière plus satisfaisante.
 - ✓ Pour des sols perméables, nous préconisons l'essai (CD) afin d'appréhender de manière plus fine les changements de volume après dissipation de la pression interstitielle.
 - ✓ Pour des sols peu perméables nous préconisons l'essai (UU) ou (CU) où la vitesse de chargement est grande par rapport au drainage du sol.

I.3. RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES SOLS

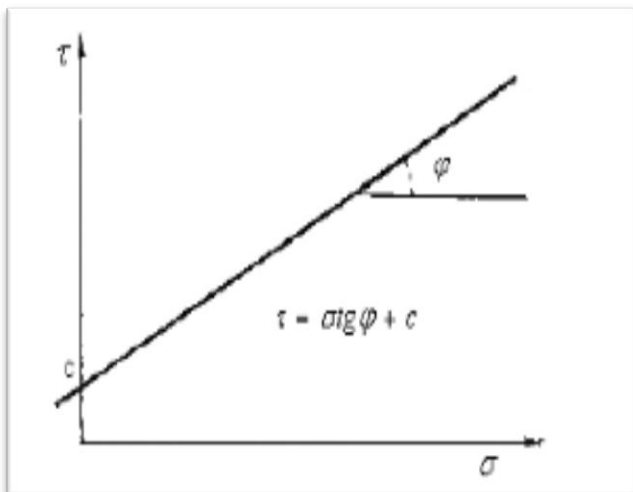
I.3.1. Généralités

La résistance au cisaillement d'un sol est la contrainte de cisaillement maximale que le sol peut supporter. En effet, en géotechnique il est très important de déterminer cette propriété

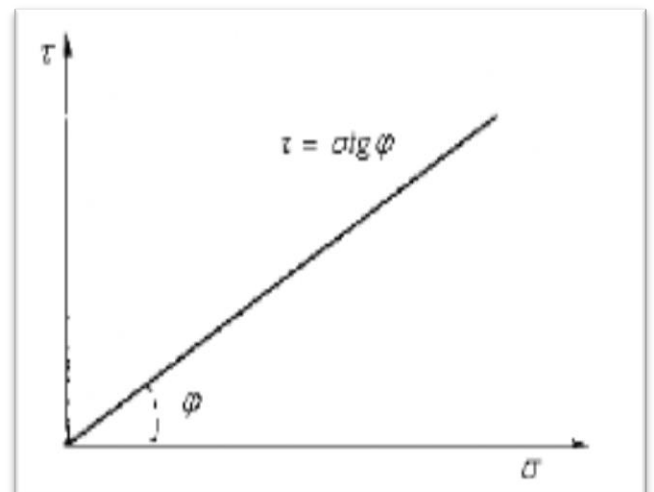
puisque'elle est un paramètre clé dans un processus de caractérisation du sol, notamment pour évaluer de la capacité portante des sols; calculer les fondations superficielles et profondes; étudier de la stabilité des pentes et glissement de terrain; vérifier les poussés et les butés pour un ouvrage de soutènement. [2]

Au 18^{em}e siècle, Coulomb a réalisé des études sur la stabilité des sols, pour les besoins de constructions militaires. A l'aide d'une boîte de cisaillement, il a réalisé des expériences qui lui permettent d'évaluer la résistance au cisaillement des sols à la rupture le long d'un plan de cisaillement. Lors de ses recherches, coulomb a remarqué que la résistance au cisaillement à la rupture était directement proportionnelle à la contrainte normale; plus cette dernière augmente, plus la résistance au cisaillement soit grande. Il a noté aussi que les sols cohérents présentent une certaine résistance au cisaillement dû à leur cohésion quand la contrainte normale est nulle. [1] En partant de ces observations, il a formulé la relation suivante, connue sous le nom **d'équation de coulomb**: $\tau = C + \sigma \tan \varphi$ (Figure I.2.a).

Pour les sols pulvérulents, comme la cohésion y est pour ainsi dire nulle, l'équation prend la forme suivante: $\tau = \sigma \tan \varphi$ (Figure I.2.b).



a. Sol cohérent (exemple : Argile)



b. Sol pulvérulent (exemple : Sable)

Figure (I.3) : Droite de coulomb

Les paramètres servant à évaluer la résistance au cisaillement d'un sol à la rupture sont donc la cohésion et l'angle de frottement. Quand on connaît la valeur de ces paramètres, il est facile de calculer τ correspondant à σ .

I.3.2. Facteurs influant les paramètres de la résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement des sols est causée par le frottement, l'enchevêtrement et les forces de cohésion entre les particules. Les facteurs qui agissant sur ces trois causes auront évidemment une grande influence sur la valeur de l'angle de frottement interne ϕ dépend principalement de la compacité du sol, de sa granulométrie et de la forme de ses particules. La compacité du sol constitue le facteur d'influence le plus important dans les sols pulvérulents: lorsqu'elle augmente, l'indice des vides (e) diminue et l'angle ϕ augmente. Par ailleurs, si l'on compare deux sols de même type et de compacité similaire, deux sables par exemple, celui qui présente une granulométrie étalée aura un angle ϕ supérieur à celui dont la granulométrie est serrée. Enfin, plus les particules d'un sol sont angulaire, plus l'angle ϕ est important ; inversement, des particules arrondies font diminuer l'angle ϕ . [1]

I.3.3. Comportement drainé et non drainé d'un sol

I.3.3.1. Comportement drainé

On parle de comportement drainé d'un sol lorsque l'application de l'effort vérifie l'une des conditions suivantes : elle est suffisamment lente, compte tenu de la perméabilité du sol (en fait, de la valeur du coefficient de consolidation C_v du sol) et de la longueur du chemin de drainage, pour n'induire à aucun moment de surpression interstitielle importante dans l'éprouvette ou dans le massif de sol ; elle a duré assez longtemps pour que les surpressions interstitielles éventuelles se soient dissipées au moment où l'on veut mesurer ou calculer le comportement du sol. En l'absence d'eau, le sol a toujours un comportement de type drainé. [2]

Les surpressions interstitielles étant nulles (ou négligeables), les efforts appliqués sont transmis intégralement au squelette du sol et les contraintes induites sont des contraintes effectives. L'application de l'effort s'accompagne d'une variation de volume, plus ou moins importante selon les contraintes appliquées. Cette diminution de volume traduit un rapprochement des grains et un volume égal d'eau Interstitielle est expulsé du sol au fur et à mesure du chargement. [2]

Les caractéristiques de résistance au cisaillement du sol dans un comportement drainé sont appelées Caractéristiques drainées. Elles sont représentatives du comportement du squelette solide.

I.3.3.2. Comportement non drainé

À l'opposé, dans le comportement non drainé, le chargement est assez rapide, compte tenu de la perméabilité du sol (ou de son coefficient de consolidation) et de la longueur du chemin de drainage, pour provoquer l'apparition de surpressions interstitielles qui ne peuvent se dissiper pendant la période considérée. [2]

Dans les essais de laboratoire, on reproduit cette situation en interdisant l'écoulement de l'eau interstitielle hors de l'éprouvette, ce qui impose la constance du volume du sol, quand il est saturé.

En l'absence de drainage et de variation de volume, les composantes normales des contraintes induites dans le milieu par l'application de l'effort sont transmises presque intégralement à la phase liquide, sans modification notable des contraintes normales effectives dans le squelette.

Les caractéristiques de cisaillement du sol dans un comportement non drainé sont dites Caractéristiques non drainées. Elles traduisent le comportement global des deux phases solide et liquide et n'ont de signification que tant que la proportion de ces deux phases n'est pas modifiée, c'est-à-dire tant qu'il n'y a pas de drainage. [2]

I.4. CONCLUSION

La résistance au cisaillement d'un sol dépend de nombreux facteurs, tels que la nature et l'état du sol, mais aussi l'intensité des efforts exercés et la manière dont ces efforts sont appliqués.

Dans les sols saturés, cette résistance est liée uniquement au squelette solide du sol, puisque l'eau interstitielle n'offre aucune résistance aux efforts de cisaillement ou de distorsion. Elle ne dépend, de ce fait, que des contraintes effectives qui s'exercent aux points de contact des particules solides. Elle est donc directement influencée par les conditions d'application de ces efforts, conditions qui commandent la répartition des contraintes totales appliquées entre les phases liquide (pression interstitielle) et solide (contrainte effective) du sol.

Chapitre II
Les déchets
caoutchouteux

II.1. INTRODUCTION:

Les déchets de caoutchouc ont été utilisés avec succès dans plusieurs applications du Génie Civil; dans le béton et le mortier sous forme de granulats, en géotechnique pour les remblais légers et également dans les mélanges d'asphaltes. Les études rapportées dans la littérature ont montré que le recyclage des caoutchoucs dans le domaine de Génie Civil, permet non seulement de réduire le cout, mais également d'améliorer certaines caractéristiques physico-mécaniques du béton et du sol en bénéficiant de leur déformabilité, étanchéité et de leur capacité d'absorption de chocs.

II.2. HISTORIQUE DU CAOUTCHOUC

Aux XVII^{ème} siècles, les Européens découvrent l'usage du caoutchouc chez les Indiens d'Amérique Centrale et d'Amérique du Sud. Ces derniers l'utilisent notamment pour la confection de balles à jouer. En 1735, le français Charles Marie de la Contamine rapporte des échantillons de latex français caoutchouc à partir de L'expression indienne (caoua-Tchou), qui signifie (bois qui pleure). Cette nouvelle matière permet d'imperméabiliser des tissus, mais elle devient poisseuse au soleil et cassante à froid. En 1819, Thomas Hancock invente la mastication, qui permet de modeler des objets à partir de caoutchouc. En 1823, Charles Macintosh découvre que le caoutchouc naturel peut se dissoudre dans le benzol, et utilise ce procédé pour la fabrication de vêtements imperméable. Mais le véritable coup d'envoi de l'industrie du caoutchouc est la découverte de la vulcanisation par Charles Goodyear en 1839. Ce traitement au soufre permet d'améliorer les propriétés mécaniques et la résistance en température de ces matériaux. L'essor automobile va accélérer la production et l'utilisation du caoutchouc naturel. [3]

II.3. DEFINITION ET TYPES DU CAOUTCHOUC

Le terme «caoutchouc» vient du mot indien caoutchouc (bois qui pleure) et rappelle ainsi l'origine du caoutchouc naturel, précurseur des élastomères d'aujourd'hui. Le caoutchouc à l'état naturel, se présente sous la forme d'une suspension colloïdale de latex secrétée par les plantes à caoutchouc. Les plus importantes de ces plantes sont l'Hévéa basiliens, arbre de la famille des euphorbiacées et d'autres espèces du même genre.

Les caoutchoucs, appelés aussi de manière plus scientifique les élastomères, appartiennent à la famille des polymères. Ils ont pour spécificité d'être thermoplastiques (600 à 1000% d'allongement). Une déformation importante peut leur être appliquée et une fois cette contrainte retirée, ils retrouvent leur forme initiale. Ils possèdent une grande plage thermique d'utilisation,

entre -50°C environ. Ils sont amortissants ou résilients. Dans le langage courant, le terme caoutchouc recouvre à la fois le caoutchouc naturel et les caoutchoucs synthétiques. [4]

II.3.1. Le caoutchouc naturel:

Provient de la transformation du latex naturellement sécrété par certains végétaux (par exemple, l'hévéa), dans ce cas il s'agit d'une matière première d'origine agro-industrielle produite à plus de 70% en Asie. [4]



Figure(II.1) : Latex naturel

Aujourd'hui le caoutchouc naturel est proposé aux industriels sous deux formes :

- **Liquide**, c'est-à-dire latex concentré à 60 % de teneur en caoutchouc sec,
- **Solide**, soit sous forme de feuille fumées RSS (Reber Smockés Sheth) ou séchées à l'air chaud compactées en balle de 113 kg, soit sous forme de granulé décompacté après séchage et spécifié techniquement TSR (Technically Spécifie Rubber) en balles de 33 kg sous emballage plastique.

II.3.2. Le caoutchouc synthétique

Fabriqués à partir des dérivés de pétrole, principalement dans les pays industrialisés. Dont les contours sont beaucoup plus larges. Le caoutchouc industriel est extrêmement diversifié, aussi bien en ce qui concerne les produits (plaques, courroies, gants...etc.) que les marchés. Ses propriétés d'élasticité, d'étanchéité et d'amortissement en font un matériau utilisable dans de

nombreuses applications : agroalimentaire, médical, équipement industriel, BTP mais aussi des applications public, activités de loisirs, etc. [4]

Les déchets du caoutchouc ont quatre origines principales :

- déchets de caoutchouc industriel (8%).
- déchets de fabrication de pneumatiques (3,5%).
- pneumatiques usagés (86,5%).
- déchets du recyclage : poudrettes, copeaux (2%).

II.4. PROPRIETES DU CAOUTCHOUC

Les caoutchoucs possèdent de très nombreuses propriétés. Ils sont notamment élastiques, étanches antivibratoires. La combinaison de ces trois propriétés leur assure un spectre d'utilisation extrêmement large. Les trois principales propriétés des caoutchoucs : élasticité, étanchéité et amortissement.

II.4.1. Elasticité

La propriété d'élasticité peut être très facilement illustrée par quelques applications grand public : l'élastique de bureau ou le saut à l'élastique. L'élasticité se caractérise par la capacité d'un matériau à se déformer sous contrainte et à reprendre sa dimension initiale lorsque cesse la contrainte.

Les caoutchoucs ne sont pas les seuls matériaux élastiques, mais ils sont les seuls à offrir une telle capacité de déformation. Ainsi, un ressort d'acier n'accepte guère de subir un allongement de plus de 10 %. En revanche, les caoutchoucs peuvent s'allonger couramment jusqu'à 500 % et dans certains cas, jusqu'à 1000 % On parle alors d'hyper-élasticité. [5]

De surcroît, les caoutchoucs conservent leur propriété d'élasticité à très basse température. Leur transition vitreuse, c'est-à-dire la température à laquelle ils se rigidifient se situe, en règle générale, aux alentours de -50 °C . [5]

- **Exemples d'application** : joints de portière d'automobile, flexibles, profilés pour portes et fenêtres, balles de tennis ou de golf, gants...

II.4.2. Etanchéité

La seconde des grandes propriétés des caoutchoucs est l'étanchéité. Les caoutchoucs sont ainsi imperméables à l'air, aux gaz et à l'eau. Ils ont également une grande capacité à filtrer le bruit. [5]

II.4.3. Amortissement

Le caoutchouc possède également la capacité d'amortir les chocs ou de filtrer les vibrations. Il s'agit là de deux propriétés extrêmement importantes dans le monde des transports (automobile, aéronautique, aérospatial, ferroviaire...), dans celui de l'industrie (production d'énergie, machine / outil...) ou encore du BTP (appuis de pont, plots antisismiques...). [5]

- **Exemples d'application :** pneumatique (amortissement des irrégularités de la route), pièces antivibratoires (filtration des vibrations en provenance du moteur ou des organes de liaison au sol).

II.5. FILIERES DE VALORISATION

Les voies de valorisation du caoutchouc sont de plus en plus objets de projets diversifiés, de recherche et développement. A titre d'exemples non exhaustifs on peut citer les axes suivants :

II.5.1. La valorisation des matières premières

Les pneumatiques usagés peuvent être broyés en poudrettes ou en granulés de caoutchouc. Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux.

Poudrettes:

La poudrette de caoutchouc est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables (PUNR) ou de déchets de rechapage. Le broyage peut être mécanique ou cryogénique (fragilisation du caoutchouc à froid). S'il est cryogénique, la poudrette obtenue est de meilleure qualité mais présente un coût plus élevé.

La poudrette est utilisée dans la fabrication des revêtements de sols industriels et sportifs, la réalisation de matériaux d'isolation phonique, de membranes anti-fissures à usage routier ou de membranes anti-vibrations destinées aux plates-formes ferroviaires, de roulettes.

Elle est également employée comme liant dans les bitumes. L'enrobé possède ainsi un pouvoir drainant important évitant le phénomène d'aquaplaning, le bruit de roulage s'en trouve réduit et le processus de vieillissement ralenti. [6]

Tableau (II.1) : Exemple de valorisation matière. [6]

Produits	Quantité de pneus utilisés
Enrobé drainant	2500 par km de route
Mur antibruit	20 000 par km de murs de 3 m de haut
Court de tennis	700 pour 680 m ² (accès inclus)
Voie de tramway	2000 par km
Aire de jeux (25mm)	1400 pour une surface moyenne de 500 m ²

☑ **Granulés:**

Il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes. Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorés ou non, et permettent, par moulage, de réaliser facilement des feuilles ou des plaques. Comme exemple d'utilisation, on a les aires de jeux, les pavés antidérapants, les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples, diminution des nuisances sonores...) D'autres types de valorisation de matière, par transformation chimique, sont possibles, telle que la régénération (par combinaison d'actions chimiques, mécaniques et thermiques), ou la Pyrolyse–Thermolyse. Les produits issus de cette décomposition, sont des huiles combustibles lourdes et légères, du carbone...etc. Le développement industriel de ces types de valorisation, est cependant freiné par le coût de mise en œuvre. [7]

II.5.2. Réhabilitation de carrière

La méthode de comblement qui fait l'objet d'un agrément pour les carrières en fin d'exploitation, consiste à alterner des couches de terre et des couches de pneus usagés de grande taille (génie civil et agraires) comme illustré à la Figure(II.2). Cette procédure de réhabilitation du site doit faire l'objet d'une surveillance scientifique sanitaire et environnementale. Sur la base de cette surveillance, il a été confirmé que l'utilisation des pneus en comblement de carrière est une application qui a toute sa place dans la valorisation des pneus usagés dès lors que cette technique est bien maîtrisée. [8]

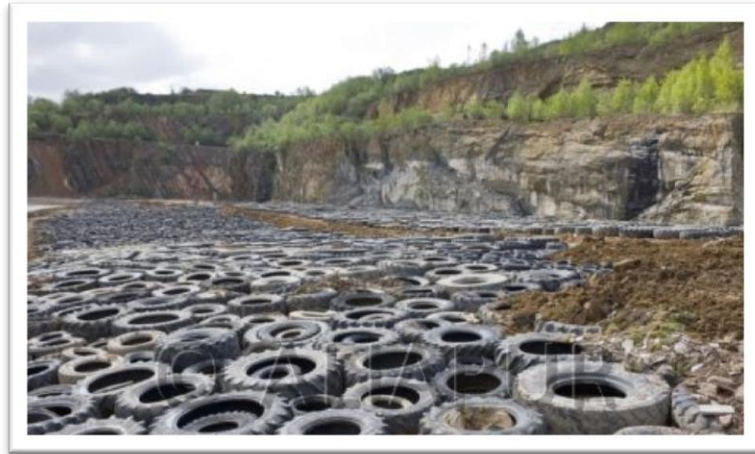


Figure (II.2) : Réhabilitation de carrière par l'utilisation de pneus usagés, [Alia pur 08].

II.5.3 La valorisation originale "La technique Pneusol"

L'Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des Déchets (ANRED) classe le Pneusol une technique mise au point au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en 1974 comme une valorisation originale. Cette technique consiste à utiliser des pneus usagés entiers dans des applications géotechniques. Actuellement, plus de deux cent cinquante ouvrages en Pneusol ont été construits en France et dans d'autres pays comme l'Algérie, les États-Unis, la Jordanie ou le Brésil, etc. dans différents domaines du Génie Civil (remblai léger, mur de soutènement, protection de pente et de berges, etc...). [8]

Le Pneusol est formé par l'association de pneus usagés non rechapables (poids lourds ou tourisme) entiers, partiellement découpés (enlèvement d'un flanc), ou totalement découpés (deux flancs et une bande de roulement) et de sols pulvérulents, cohérents ou déchets. Les éléments de pneus, sont utilisés comme renforts du massif de sol. [7]

Les bandes de roulement ou les flancs, sont découpés et associés en nappe par des attaches. Ces bandes peuvent être posées sur chant ou aplaties. Dans le cas de l'emploi des flancs, ceux-ci sont posés à plat. Cette technique développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris par Dr Nguyen Thanh LONG ingénieur du LCPC de Paris, est largement diffusée depuis 1982. [7]



Figure(II.3) : Le chantier Cannes-Mandelieu en 1988 avec la technique de Pneusol®.

II.5.3.1. Les avantages de la technique de Pneusol

Les principaux avantages confère le Pneusol aux ouvrages utilisant cette technique sont essentiellement :

- Une souplesse d'adaptation permettant de supporter des tassements différentiels important.
- Une meilleure répartition des efforts dans la masse du matériau et sur les fondations.

II.5.3.2. L'intérêt de la technique de Pneusol

- Valorisation de déchets (on estime qu'il est produit 35 000 000 de pneus usagés par an en France).
- Montage simple et économique (coût Pneusol=50% coût ouvrage traditionnel).
- Approvisionnement des constituants aisé : on trouve des pneus usagés partout dans le monde et se prête à une large gamme d'utilisation de remblais (seuls les matériaux argileux mous sont à proscrire).
- Mise en œuvre ne faisant pas appel à de gros moyens. [9]

II.6. EMPLOI DE CAOUTCHOUC EN GENIE CIVIL

II.6.1. Granulats :

Des études ont été réalisées concernant l'opportunité d'incorporer des granulats issus du broyage de pneus usagés dans des mortiers et bétons à base cimentaire.

Par cette incorporation, il s'agit à la fois d'alléger le béton et d'en augmenter les performances (accroissement de la résistance à la fissuration et de la capacité de déformation de ces matériaux). Les essais de littérature menés sur des mélanges à bases cimentaires ont non

seulement montré une nette amélioration de la résistance à la fissuration en laboratoire mais surtout sur des planches d'essais en extérieur soumises aux aléas climatiques.

L'ajout de granulats issus de (PUNR) confère au béton une durabilité accrue, et une plus grande aptitude à l'absorption des vibrations mécaniques, sans difficultés de mise en œuvre.

➤ *A l'état frais*

L'effet de l'ajout des particules de caoutchouc à une matrice cimentaire sur la consistance de béton, a été analysé par plusieurs chercheurs. En effet, il a été rapporté dans la littérature que la présence des granulats en caoutchouc dans une matrice cimentaire rend le béton plus léger. La réduction de la densité de béton est due à la faible densité du caoutchouc par rapport aux granulats naturels. [10]

L'ouvrabilité du béton peut être définie comme étant la facilité avec laquelle le béton est malaxé, transporté et mis en place. Khatib & Bayomy (1999) ; Albano et al. (2005); Khaloo et al. (2008), ont étudié l'ouvrabilité des bétons caoutchouteux. Les auteurs ont rapporté une tendance à la réduction de l'affaissement avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats par les particules de caoutchouc présentent une ouvrabilité plus grande par rapport à ceux préparés avec des particules plus grossières. [10]

➤ *A l'état durci*

La résistance à la compression est une caractéristique fondamentale dans le processus de caractérisation des matériaux à bases cimentaires. Les résultats des plusieurs recherches indiquent que la résistance en compression du béton est influencée par la taille et le taux de substitution des particules de caoutchouc.

Eldin NN Senouci (1994), ont indiqué que le béton préparé à base de granulats de caoutchouc présente une résistance plus faible que le béton conventionnel. Ils ont observé une chute de résistance de l'ordre 85% lorsque la totalité des granulats grossiers ont été remplacés par le caoutchouc et 65% lorsque le sable est remplacé par le caoutchouc.

Tableau(II.2): Chute de résistance en compression obtenues par Topçu(1995). [10]

Caoutchouc	Sur cylindre (%)			Sur cube (%)	
	7 jours	28 jours	6 mois	28 jours	6 mois
Fin	40	37	78	56	71
Grossier	59	57	77	81	75

Topçu (1995), de son côté, a examiné le comportement d'un béton avec caoutchouc. Il a étudié l'effet de la taille et le taux de remplacement. Il a utilisé le caoutchouc sous deux forme, poudrette (0/1mm) et particules (1/4mm). Les chutes maximales de résistances en compression obtenus par Topçu (1995), correspondant à un taux de remplacement de 45%, sont présentées dans le tableau (II.2). Les résultats montrent que les mélanges contenant la poudrette fine sont moins sensibles par rapport à ceux préparés à base des particules plus grossières. [10]

II.6.2. Renforcement des sols

La technique de Pneusol a été utilisée sur de nombreux chantiers, pour résoudre des problèmes varies, en réparation ou en ouvrages neufs, en soutènement ou en remblai mais généralement on distingue deux famille :

II.6.2.1. Remblais allégés et absorbeurs d'énergie

Le but est de conserver une présence de vide dans le pneusol, soit pour réduire la masse du remblai (sols compressibles) soit pour permettre une déformation et absorber de l'énergie. Dans ce cas, en mode constructif, on va privilégier l'utilisation de pneus de camions entiers, sans les lier ensemble. Les vides étant parfois accentués par la pose de géotextile limitant le remplissage des flancs [9]. Les différentes applications concernent des :

- Remblais allégés (Passages de zones compressibles)
- Répartiteur de contraintes au-dessus des ouvrages enterrés
- Absorbeur d'énergie (Construction type pneusol allégés => présence de vides) :
 - Piège à matériaux (type digue en pied de zone de chute de blocs).
 - Absorbeurs d'ondes sismiques.



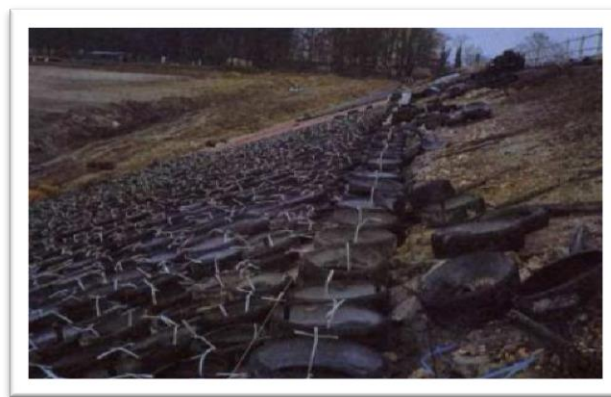
Figure(II.4) : Absorbeur d'ondes sismiques



Figure(II.5) :Protection contre le chute de blocs.

II.6.2.2. Pneusol de soutènement

Le but est de reconstituer un mur homogène, le plus dense possible et résistant aux poussées. Dans ce cas, la résistance interne du mur est obtenue par des nappes (soit de pneus liaisonnés entre eux, soit des géotextiles, soit des armatures treillis soudés). Pour un remplissage rapide, on découpe le flanc supérieur du pneu. Les principales applications concernent des murs de soutènement et les ouvrages anti érosion.



Figure(II.6) : Ouvrage en pneus anti-érosion

II.7. QUELQUES OUVRAGES PAR LA TECHNIQUE PNEUSOL EN ALGERIE

Plus de 2000 ouvrages valorisant les pneus, selon les différentes techniques, sont connus dans le monde, en Algérie, au Canada, aux Etats-Unis et en France. Et plus de 12 ouvrages pneusol anti Marston, sont réalisés en Algérie en 1986. Le premier chantier expérimental Algérien de la technique Pneusol, était les travaux de stabilisation d'un talus de remblai d'une hauteur de 5 m environ avec une largeur de 50 m (soit environ 3500 pneus poids lourds utilisés)

au niveau d'un ouvrage courant du projet de contournement de Bou Smail. Actuellement plus de 250 ouvrages ont été construits en France. [7]

Projet pilote ; réalisation d'une planche expérimentale, qui a consisté à l'exécution d'un remblai par la technique "pneusol". Ce remblai a été mis en place au pied d'un grand talus d'une hauteur de 13m, exécuté dans le cadre des travaux de réalisation de l'évitement de la ville de Bou Smail dans la wilaya de Tipaza. Ce projet qui est le premier dans son genre en Algérie, a comme rôle principale d'augmenter la stabilité du talus de la route, et de raidir sa pente et enfin alléger les charges sur le côté aval d'un dalot. [3]

- Nombre de pneus utilisés : 5353 pneus.
- Inauguration et mise en circulation 12 mai 2005[MTP, DTP de Tipaza, ENSTP, CTPP, ETRHB].



Figure (II.8) : Renforcement d'un talus de la ville de Bou-Smail

Un autre exemple d'application de cette technique en Algérie est réalisé à proximité du Oued Bou Arfa (wilaya de Blida), avec la mise en place de 9 nappes de pneus sur un linéaire de 30m, les nappes de pneus sont remplies de béton, il est prévu un recouvrement complet de ces nappes en pneumatiques par du tout venant d'oued assurant une double protection. Ce projet a consommé environ 350 pneus usagés. [3]

II.8. AUTRES UTILISATIONS DU CAOUTCHOUC

II.8.1. Murs anti-avalanches ou anti chute de pierres : Solidement attachés les uns autres selon une technique mise au point par les Ponts et Chaussées, les pneus de poids lourds sont remplis de terre et élevés en murs. Cette technique fait conjointement appel à la souplesse et à la résistance des pneus, que la végétation finit par recouvrir entièrement.

II.8.2. Sous-couches de routes une autres : Une autre technique des ponts et chaussées permet de stabiliser et renforcer certaines routes de montage avant la pose du bitume.

II.8.3. Gazons synthétiques pour les stades de foot ou de rugby : Sous forme de granulats qui maintiennent les fibres d'herbe synthétique, ce type de gazons permet une utilisation illimitée du stade, une qualité de jeu identique en toute saison, une lutte contre la sécheresse ou l'inondation des terrains, une réduction de l'arrosage et de l'entretien.

II.8.4. Aires de jeux amortissantes pour enfants : dalle de sols sportifs souples sous forme de granulats liés entre eux pour former un tapis.

II.8.5. Tapis ferroviaires : tapis déroulés sur une voie de chemin de fer, entre le béton et le gravier, constitués de bandes de roulement découpés des flancs, mis en place en deux lits croisé. Ils permettent une réduction du bruit et des vibrations générées par le trafic ferroviaire.

II.9. CONCLUSION

L'utilisation des déchets caoutchouteux dans le domaine du génie civil a connu un développement rapide durant les dernières années. Ils ont entièrement remplacé les matériaux de construction traditionnels. Dans de nombreux cas, l'utilisation d'un déchet du caoutchouc peut augmenter le facteur de sécurité, et réduire les coûts en comparaison avec les matériaux classiques de construction.

Chapitre III
Matériaux et
procédures
expérimentales

III.1. INTRODUCTION

L'objectif principal de ce travail est l'étude de l'influence des fibres caoutchouteuses sur les propriétés mécaniques d'un sable de dunes. Ce chapitre a pour objectif de présenter les résultats d'identification des matériaux utilisés. De plus, une brève description du site de prélèvement du sable étudié, a été présentée.

III.2. LOCALISATION DU SITE DE PRELEVEMENT

Le site de prélèvement est situé dans la partie nord de la ville de Boussaâda, où d'importantes constructions ont été édifiées sur des terrains constitués essentiellement de dunes de sable (figure III.1). Le choix de ce site a été motivé, notamment, en raison des dégradations apparues dans certaines constructions visiblement fondées directement sur les dunes. [11]

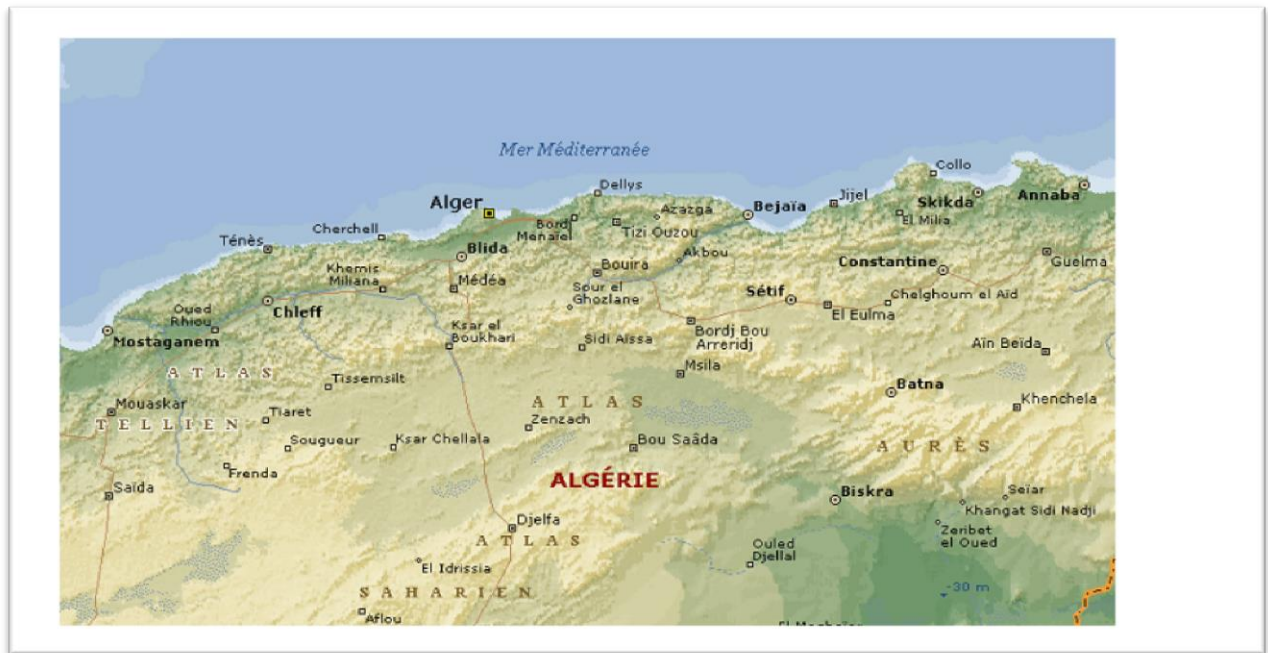


Figure (III.1): Localisation du site de prélèvement

III.3. CARACTERISATIONS DU SABLE

III.3.1. La masse volumique (NF P 18-554)

III.3.1.1. La masse volumique apparente

a. L'état lâche

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

■ Equipements utilisés

- Un récipient de volume 900cm³.
- Une règle à araser.
- Balance de précision.
- Entonnoir trépied.

■ Mode opératoire :

- On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- On pèse le récipient vide M_1 .
- En place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm remplit avec du sable, et laisser tomber l'échantillon.
- Verser ainsi l'échantillon, toujours au centre de la mesure, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône.
 - Araser à la règle et peser le contenu. Soit M_2 poids de l'ensemble (sable + récipient).

La masse volumique apparente à l'état compact est calculée par l'expression :

$$\rho_{app} = (M_1 - M_2) / V_r$$

M_1 : masse de récipient.

M_2 : masse de (récipient + sable).

V_r : volume de récipient.

L'essai est répété 3 fois pour un volume de 900 cm³ et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.



Figure(III.2) :L'essai de la masse volumique apparente

b. L'état compact

La masse volumique à l'état compact et la masse du matériau par unité de volume après compactage y compris les vides restants entre les grains, Elle est souvent supérieure à la masse volumique à l'état lâche. Même procédure que celle à l'état lâche après remplissage du récipient (avec compactage).

➤ **Résultats :**

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux suivants :

Tableau(III.1): La masse volumique apparente à l'état lâche

N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	ρ_{app} (g/cm ³)	ρ_{moy} (g/cm ³)
1	116	1465	1.50	1.5
2	116	1472	1.51	
3	116	1446	1.48	

Tableau(III.2): La masse volumique apparente à l'état compact

N° d'essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	ρ _{app} (g/cm ³)	ρ _{mo} y (g/cm ³)
1	116	1655	1.71	1.72
2	116	1661	1.72	
3	116	1660	1.72	

III.3.1.2. La masse volumique absolue

La masse volumique absolue est définie comme le rapport de la masse de l'échantillon par le volume de sa matière (volume absolue tous vides déduits).

▮ *Equipements utilisés*

- Des éprouvettes graduées.
- Balance de précision.
- L'eau potable.
- Balance de précision.

▮ *Conduite de l'essai*

Méthode de l'éprouvette graduée :

Cette méthode est très simple et très rapide. Toute fois sa précision est faible.

- Mettre dans une éprouvette graduée un volume V_1 d'eau (300ml).
- Peser une masse (M) du sable (300g), et l'introduire dans l'éprouvette.
- Bien remuer pour éliminer les bulles d'air.
- Lire le nouveau volume(V_2).
- La masse volumique absolue est donc : $\rho_{abs} = M / (V_1 - V_2)$

Les résultats obtenus sont :

Tab (III. 3) : La masse volumique absolue du sable de dune.

N ° d'essai	V ₁ (cm ³)	M(g)	V ₂ (cm ³)	ρ_{abs} (g/cm ³)	ρ_{moy} (g/cm ³)
1	300	300	413	2,65	2,67
2	300	300	412	2,68	
3	300	300	412	2,68	

III.3.2. Analyse granulométrique par tamisage (NF 18-304)

On peut définir l'analyse granulométrique par tamisage comme l'ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

■ *But de l'essai :*

La granulométrie ou analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
- En déduire le Module de finesse (M_f).

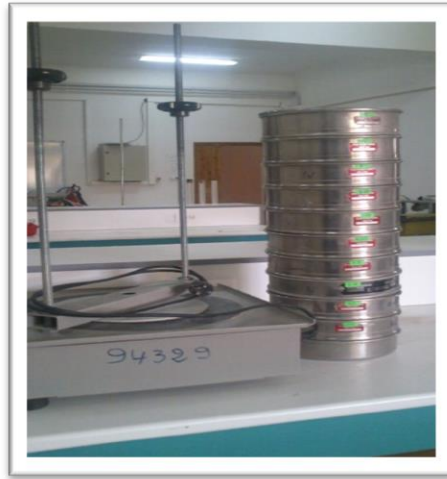
■ *Matériel nécessaire*

- Une colonne de tamis d'ouvertures de maille (2-1-0.5-0.315-0.2-0.1-0.08). La colonne est coiffée par un fond et un couvercle.
- Une tamiseuse mécanique.
- Une balance de précision.
- Un pinceau souple pour nettoyage des tamis.

■ *Mode opératoire*

- On obtient une quantité de sable sèche (La masse utilisée est 1.5kg).
- Peser chaque tamis vide à 1g précision.

- Préparer la colonne des tamis dont les dimensions de trous sont de haut en bas : 2-1-0.5-0.315-0.2-0.1-0.08.
- Versé le sable en haut de la colonne des tamis qui sont fixé sur la tamiseuse.
- Agiter mécaniquement cette colonne 5mn.



Figure(III.3) : Série de tamis et tamiseuse électrique.

➤ **Résultats :**

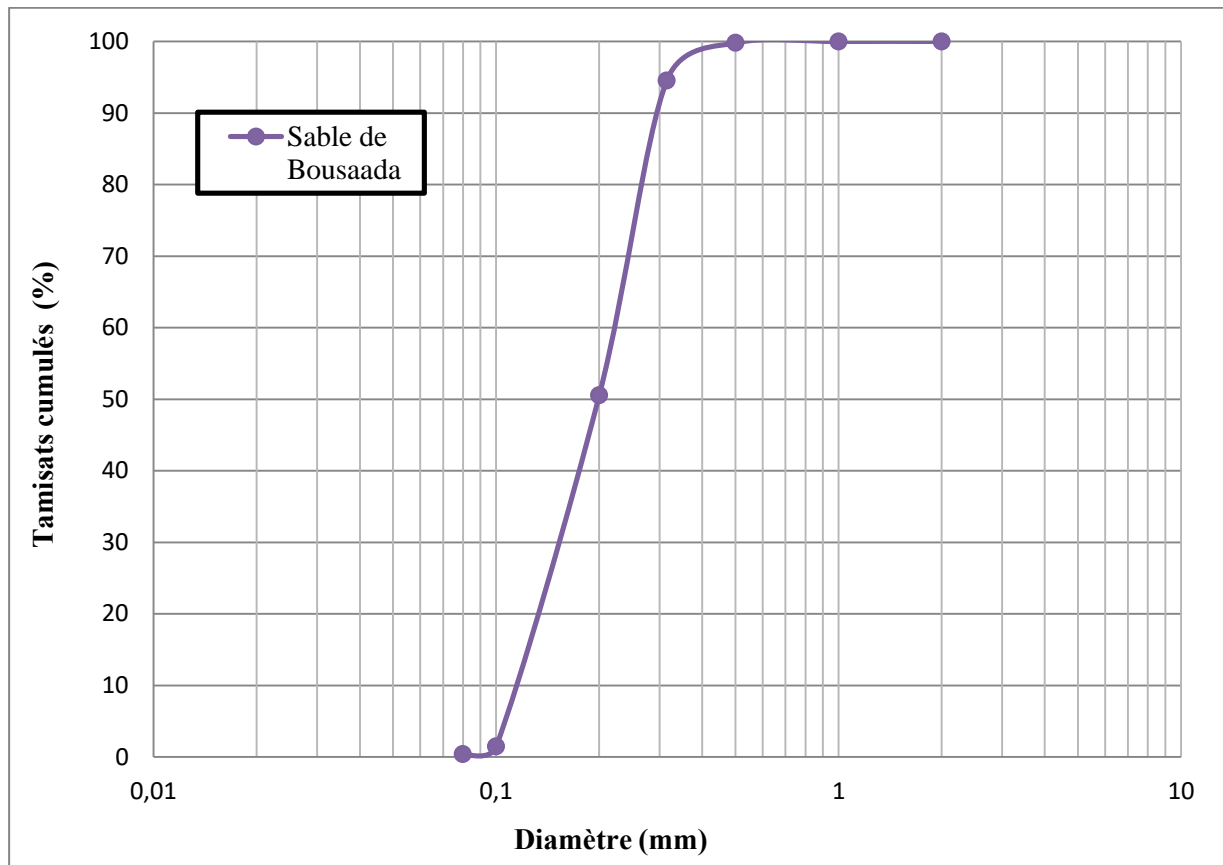
Les résultats obtenus sont regroupées dans le tableau (III.4).

Tab(III.4) : Résultats d'analyse granulométrique de sable des dunes.

Tamis (mm)	Tare (g)	Tare+refus (g)	Refus Partiels (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
				(g)	(%)	
2	573	573	0	0	0	100
1	519	519	0	0	0	100
0,5	451	454	3	3	0.2	99.8
0,315	469	548	79	82	5.47	94.53
0,2	423	1083	660	742	49.47	50.53
0,1	423	1159	736	1478	98.53	1.47
0,08	270	286	16	1494	99.6	0.4
Fond	452	456	4	1498	99.87	0.13

- Diamètre correspondant à 60% des tamisât : $d_{60} = 0,22$ mm
- Diamètre correspondant à 10% des tamisât : $d_{10} = 0,125$ mm
- Diamètre correspondant à 30% des tamisât : $d_{30} = 0,17$ mm
- Coefficient d'uniformité : $C_u = d_{60}/d_{10} = 1,83$
- Coefficient de courbure : $C_c = (d_{30})^2 / d_{60} \cdot d_{10} = 1,09$
- Pourcentage des éléments à 2 mm = 100%
- Pourcentage des éléments à 0,08 mm = 0,13%

D'après les résultats obtenus à l'essai d'analyse granulométrique et selon la classification de L.P.C des sols grenus on a plus de 50% des éléments supérieurs à 2 mm, moins de 5% des éléments inférieurs à 0,08 mm et $C_u < 6$ alors notre sable est un sable propre mal gradué.



Figure(III.4) : Courbe granulométrique du sable des dunes

III.3.3. Equivalent de sable (NF P 18-598)

▮ *But de l'essai*

L'équivalent de sable a pour but d'apprécier la qualité d'un sol sablonneux en évaluant la proportion relative des poussières fines ou des éléments argileux dans ce sol par rapport aux éléments sableux.

▮ *Équipement utilisé :*

- 03 éprouvettes cylindriques transparentes, chacune est graduée.
- Un bouchon en caoutchouc permettant de fermer l'éprouvette.
- Un piston taré en métal inoxydable.
- Un entonnoir pour transvaser le sable dans l'éprouvette.
- Machine agitatrice électrique.
- Règle de mesure.
- L'eau distillée.

▮ *Mode opératoire*

On effectuera simultanément trois mesures d'ES et pour être comparables, les trois essais doivent être effectués exactement dans les mêmes conditions.

Pour chaque essai :

- Remplir l'éprouvette jusqu'au premier trait (10cm) avec solution lavant.
- Verser la quantité de sable sec pesé (110g), à l'aide de l'entonnoir, dans l'éprouvette placé verticalement.
- Taper à plusieurs reprises la base de l'éprouvette fortement sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser un bon mouillage de l'échantillon puis le laisser reposer 10minute.
- Boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc.
- Agiter l'éprouvette horizontalement, (90 fois allers retours en 30s). (figure III.5).
- Placer l'éprouvette verticalement, ôter le bouchon et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec solution lavant, réglée à faible débit.
- En descendant le tube laveur dans l'éprouvette, rincer les parois, puis enfoncer le tube jusqu'au fond pour laver le sable, et faire remonter les particules argileuses, l'éprouvette étant toujours dans la position vertical; pour cela, imprimer un mouvement doux de piquage et rouler le tube laveur entre le pouce et l'index tout en faisant tourner lentement l'éprouvette avec l'autre main.



Fig(III.5) :Agiter dans l'agitateur pendant 30s Fig(III.6) :Après l'agitation laisser reposer 20mn

- Laisser reposer 20mn(figure III.6).
- Mesurer la hauteur de sable propre seulement (h_2) et la hauteur du sable propre y compris le flocculat (h_1 : sable propre +élément fins).
- Mesurer la hauteur du sable plus précisément avec le piston taré (h'_2).

- ✓ L'équivalent de sable visuel est : $ESV = (h_2/h_1) * 100\%$
- ✓ L'équivalent de sable au piston est : $ESP = (h'_2/h_1) * 100\%$

➤ **Résultats**

Les résultats de l'équivalent de sable visuel et au piston représentés dans les tableaux (III.5) et (III.6) respectivement.

Tableau (III. 5) : Equivalent de sable visuel.

N° d'essai	h_1 (cm)	h_2 (cm)	ESV(%)	ESVmoy (%)
1	9.9	8.5	85.86	84.12
2	10.1	8.5	84.16	
3	10.2	8.4	82.35	

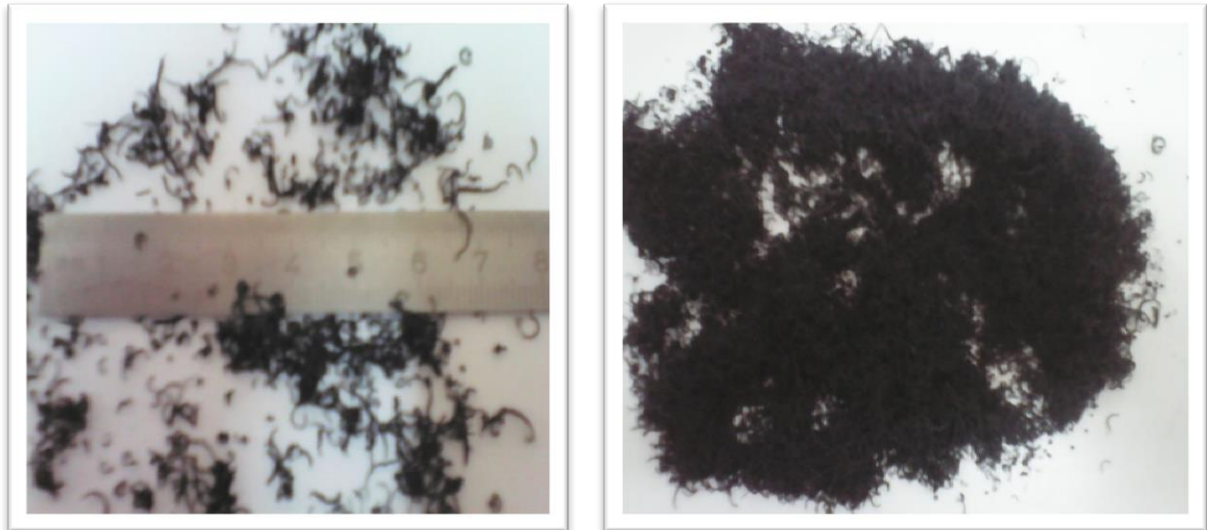
Tableau (III. 6) : Equivalent de sable par piston.

N° d'essai	h_1 (cm)	h'_2 (cm)	ESP(%)	ESPmoy (%)
1	9.9	7.4	74.75	72.21
2	10.1	7.1	70.30	
3	10.2	7.3	71.57	

D'après les résultats obtenus, on peut dire que le sable de Boussaâda est propre à faible pourcentage de file.

III.4. FIBRES DE CAOUTCHOUC

Pour atteindre les objectifs de l'étude des granulats en caoutchouc livrés par la société SAEL (Alger) ont été utilisés. Cette société est dotée d'une unité de recyclage des déchets de caoutchouc résultants des différentes étapes de fabrication de leurs produits (les joints, les semelles de chaussures, durites, supports, etc.). La photographie de la Figure (III.7) présente un échantillon des fibres obtenues. Les fibres de caoutchouc employées ont une densité spécifique de: 0.88 g/cm^3 .



Figure(III.7) : Fibres de caoutchouc utilisées.

➤ *Caractéristiques des fibres utilisées*

- Longueur : de 3mm à 16mm.
- Diamètre : 1mm.
- Densité : 0,88 g/cm³.

➤ *La masse volumique de caoutchouc*

Méthode du pycnomètre : c'est nettement plus précis, mais plus délicat.

▮ *Processus*

- Préparer un échantillon de (10 g du caoutchouc).
- Peser le pycnomètre avec son couvercle, soit M0.
- Dévisser le couvercle et introduire le caoutchouc. Peser l'ensemble, soit M1.
- Remplir la bouteille à moitié avec de l'eau. Ajouter de l'eau jusqu'à 2cm du bord supérieur, visser à fond le couvercle et remplir à l'aide d'une pissette par le trou supérieur.
- Secouer le pycnomètre en rebouchant avec le doigt le trou de couvercle. Laisser reposer un bon moment.
- Essuyer les parois extérieures du pycnomètre et peser l'ensemble, soit M2.
- Vider le pycnomètre, le laver et le remplir d'eau jusqu'au niveau du trou supérieur.
- Essuyer les parois extérieures du pycnomètre et peser l'ensemble, soit M3.
- La masse volumique absolue du caoutchouc calcul par la relation

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{(M1-M0)}{(M3-M0)-(M2-M1)}$$

➤ **Résultat**

Les résultats d'essais regroupés dans le tableau (III.7).

Tableau (III.7) : La masse volumique absolue du caoutchouc.

N° d'essai	1	2	3
M0 pycnomètre (g)	68.14	67.92	68.84
M1 (caoutchouc +pycnomètre) (g)	78.86	78.12	78.86
M2 (pycnomètre +caoutchouc +eau) (g)	167.92	166.81	167.92
M3 (pycnomètre +eau) (g)	169.41	168.09	169.35
ρ_{abs} (g/cm ³)	0,88	0,89	0,88
ρ_{moy} (g/cm ³)	0,88		

III.5. DISPOSITIF EXPERIMENTALE ET PROCEDURE D'ESSAIS

III.5.1. L'essai à la boîte de cisaillement

Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante. L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne φ et sa cohésion C (dans notre cas la cohésion est nulle). Ces valeurs servent entre autre à déterminer la contrainte admissible par le sol dans le cas de fondations superficielles et la poussée du sol sur un mur de soutènement.

III.5.2. Principe de l'essai de cisaillement

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un piston d'exercer sur le sol une contrainte normale σ déterminée. La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement F est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure. Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon. L'échantillon subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan un posé sur lequel on exerce une contrainte normale déterminée.

III.5.3. Appareillage

i. La machine de cisaillement

Elle comporte essentiellement:

- Un chariot Porte-boîte, entraîné horizontalement à Vitesse constante, entraînant lui-même la demi-boîte inférieure et l'éprouvette d'essai.
- Un anneau dynamométrique, retenant la demi-boîte supérieure, dont les déformations indiquent les efforts tangentiels développés dans le plan de cisaillement.
- Un système levier-étrier, appliquant sur le piston de la boîte les charges normales désirées, trois l'aide de différent poids.

ii. La boîte de CASAGRANDE

La boîte de cisaillement comporte essentiellement:

- Une demi-boîte inférieure, munie d'une pierre poreuse plate, striée ou dentée.
- Une demi-boîte supérieure.
- Un piston muni a sa base d'une pierre poreuse plate, striée ou dentée, glissant librement dans la demi-boîte supérieure et transmettant à l'éprouvette l'effort vertical exercé.
- Deux goupilles, solidarissant les deux demi-boites, avant l'essai.

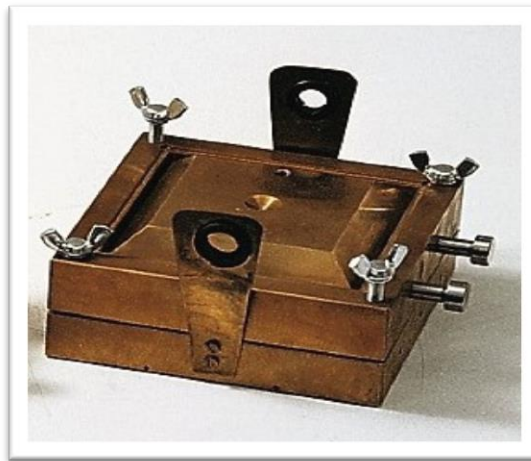


Figure (III.8) : Boîte de cisaillement

III.5.4. Procédure d'essais*a. Mise en place de la boîte sur la machine*

- ◆ Placer l'étrier de charge sur le piston de la boîte,
- ◆ Placer le comparateur vertical et le mettre à zéro,
- ◆ Monter l'anneau dynamométrique sur la machine, le relier à la boîte et compenser les jeux en mettant l'anneau légèrement en traction et en ramenant lentement le comparateur de l'anneau au zéro,

- ◆ Appliquer sur l'éprouvette la charge normale désirée. Les pressions normales peuvent être les suivants : 100, 200 et 400 KPa.
- ◆ Pour appliquer cette charges normales, placer sans choc des poids convenables sur le plateau de la machine et s'assurer que le bras de levier est horizontal à l'aide du niveau prévu à cet effet.
- ◆ Mettre à zéro le comparateur du dispositif de compensation de la déformation de l'anneau, si l'appareil est muni d'un tel dispositif.
- ◆ Désolidariser les demi-boîtes en enlevant les goupilles.
- ◆ Mettre en route à la vitesse désirée.

b. Vitesse de l'essai

- ◆ La vitesse sera de l'ordre de 1mm/mn

c. Lectures

- ◆ La lecture de l'anneau ce fait au cours de l'essai chaque un déplacement de mm (environ toutes les 15 secondes pour les essais à 1mm/mn).
- ◆ Arrêter l'essai lorsque la contrainte de cisaillement est devenue constante ou si elle continue à croître, lorsqu'on a une déformation horizontale relative d'environ 10%.

d. Fin de l'essai

- ◆ Enlever les poids du plateau de charge.
- ◆ Débloquer l'anneau dynamométrique.
- ◆ Enlever la boîte du chariot de la machine.
- ◆ Sortir l'éprouvette de la boîte.
- ◆ Nettoyer la boîte de cisaillement.

III.6. PREPARATION DES MELANGES

Pour étudier l'effet des fibres de caoutchouc sur la résistance au cisaillement du sable, nous avons ajouté les fibres aux dosages suivants; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2%. Ces pourcentages sont exprimés par rapport à la masse sèche du sable. Les mélanges de sable renforcé aux fibres ont été comparés au mélange de référence (sans caoutchouc). Dans l'objectif d'avoir un mélange sable/fibre assez homogène que possible, nous avons préparé les mélanges par ajout des fibres à faibles quantités pendant que le mélange est malaxé pendant 30 secondes. La photographie de la Figure (III.9), montre l'aspect du sable renforcé aux fibres.



Figure (III.9): Aspect du sable renforcé au caoutchouc

➤ *Quantité de fibres utilisées:*

Volume de la boîte de Casagrande ($6 \times 6 \times 3$) = 108 cm³

* La densité de sable à l'état lâche : $\gamma = 15$ KN/m³ (M=162g)

* La densité de sable à l'état dense : $\gamma = 17.2$ KN/m³ (M=185.76g)

Alors pour 0.25% de fibre en caoutchouc :

100% → 162g

0.25% → X X=0,41g

La quantité des fibres du caoutchouc pour les différents dosages est :

Tableau (III.8): Quantité de fibres utilisées.

Pourcentage de fibre en caoutchouc(%)		0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2
Quantité de fibre(g)	L'état lâche	0	0.41	0.81	1.22	1.62	2.03	2.43	2.85	3.24
	L'état dense	0	0.46	0.93	1.39	1.86	2.32	2.79	3.25	3.72

III.7. PROGRAMME EXPERIMENTAL EXECUTE

Au plan quantitatif, le programme expérimental a comporté la réalisation de deux séries d'essais de cisaillement direct:

- Une première série, dans laquelle le sable a été lâche;
- Une seconde série, dans laquelle le sable a été suffisamment compacté (sable dense).

Pour la distinction des essais, le codage suivant a été adopté A_B_C tel que ;

A : Densité (L : lâche D : dense)

B : contrainte normale appliquée pendant le cisaillement

C : pourcentage du caoutchouc ajouté

Le tableau (III.7) présente le programme d'essais exécuté.

Tableau III.7: Programme d'essais de cisaillement exécuté.

Série	Essai	σ (kPa)	Indice de densité I_d (%)	Indice de vide e_0
1	Sable lâche (SL)			
	L-100-0 à 2%	100	0,15	0,67
	L-200-0 à 2%	200		
	L-400-0 à 2%	400		
2	Sable dense (SD)			
	D-100-0 à 2%	100	0,9	0,31
	D-200-0 à 2%	200		
	D-400-0 à 2%	400		
σ : Contrainte de confinement. I_d : Indice de densité. e_0 : Indice de vide initial.				

Chapitre IV
Résultats et
discussions

IV.1. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objet de présenter et interpréter les résultats d'essais de cisaillement direct du sable de Boussaâda contenant des fibres en caoutchouc.

IV.2. Présentation des résultats d'essais de cisaillement

IV.2.1. Effet des fibres caoutchouteuses sur la résistance au cisaillement

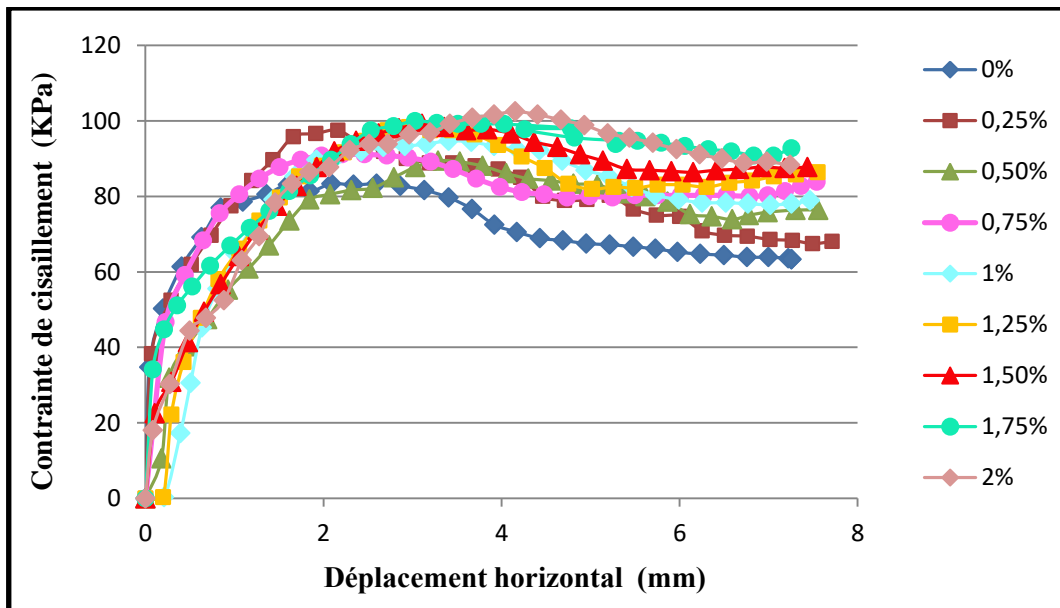


Fig. (IV.1): Effet du caoutchouc sur la résistance au cisaillement à l'état lâche ($\sigma_n=100\text{KPa}$).

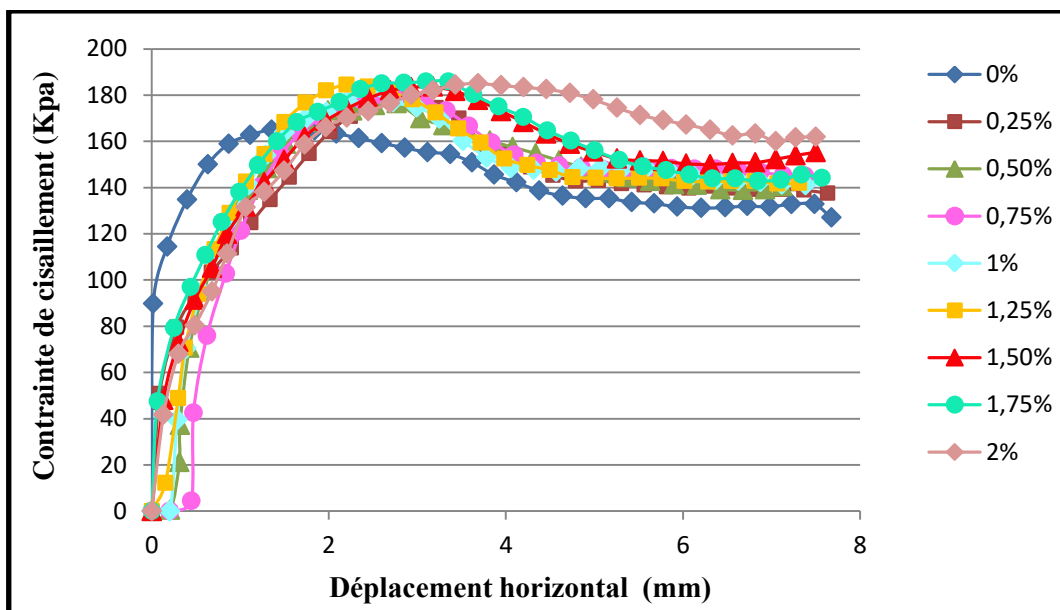


Fig. (IV.2): Effet du caoutchouc sur la résistance au cisaillement à l'état lâche ($\sigma_n=200\text{KPa}$).

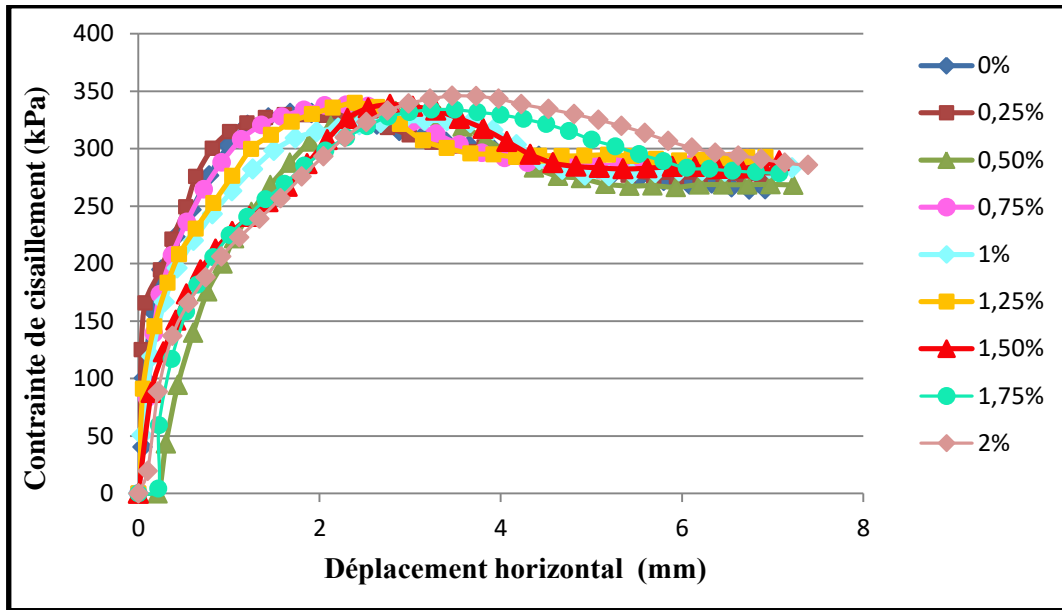


Fig. (IV.3): Effet du caoutchouc sur la résistance au cisaillement à l'état lâche ($\sigma_n=400\text{KPa}$).

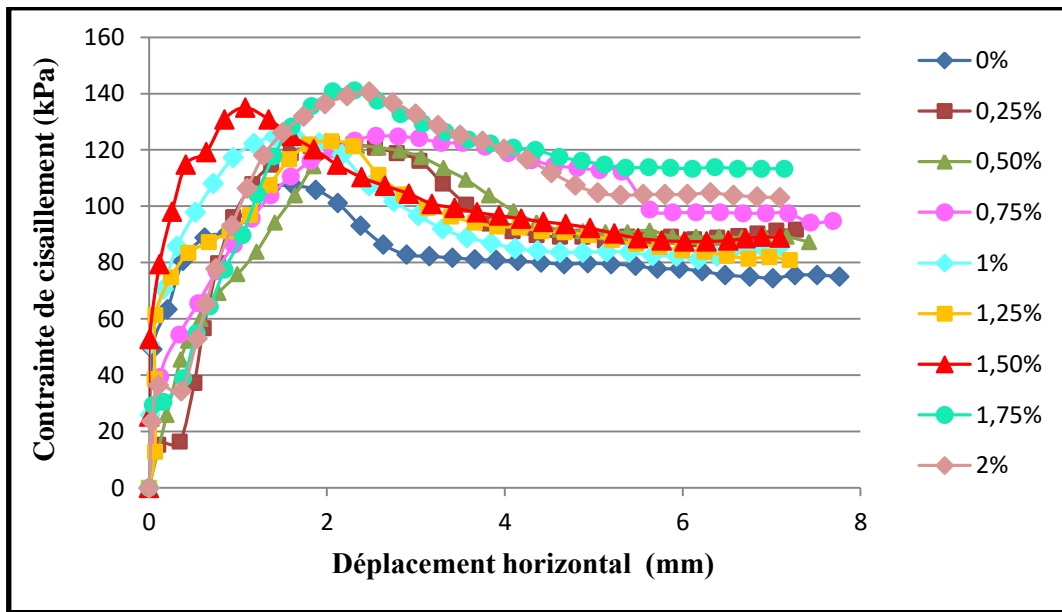


Fig. (IV.4): Effet du caoutchouc sur la résistance au cisaillement à l'état dense ($\sigma_n=100\text{KPa}$).

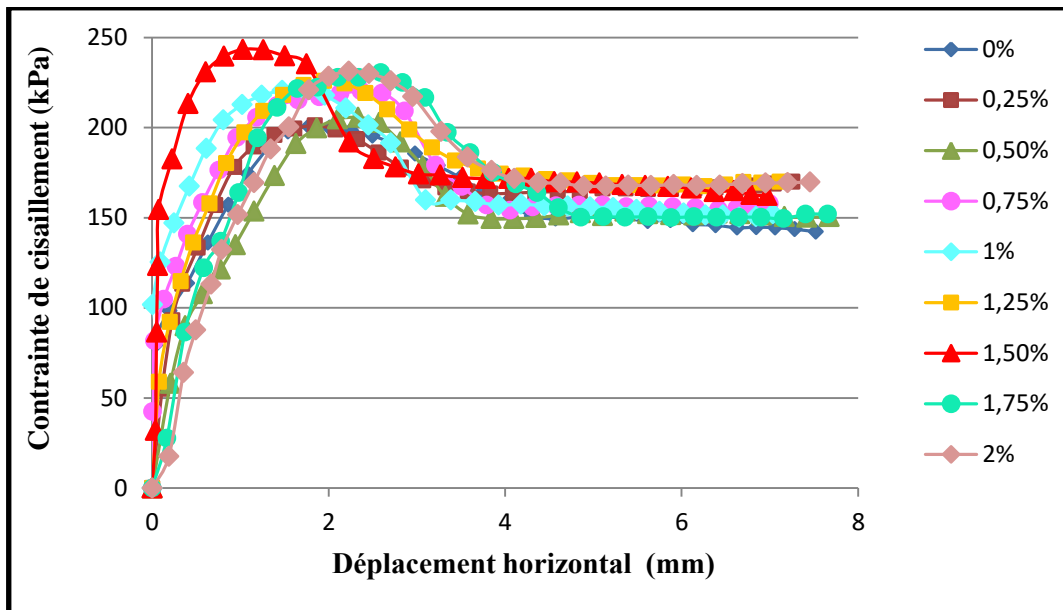


Fig. (IV.5): Effet du caoutchouc sur la résistance au cisaillement à l'état dense ($\sigma_n=200\text{KPa}$).

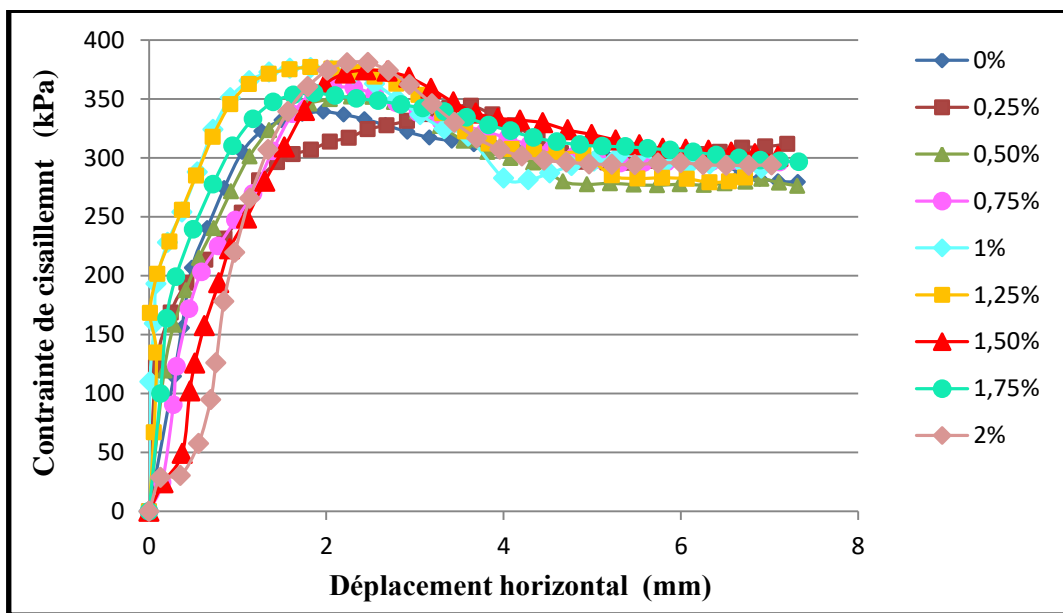


Fig. (IV.6): Effet du caoutchouc sur la résistance au cisaillement à l'état dense ($\sigma_n=400\text{KPa}$).

➤ Analyse de résultats

Les figures (IV.1-3) et (IV.4-6) présentent les résultats d'essais au cisaillement direct du sable de dunes aux états lâche et dense, respectivement. Dans le but d'analyser l'effet de l'ajout du caoutchouc sur la résistance au cisaillement de sable, nous avons incorporé les fibres en caoutchouc dans le sable en différents pourcentages (0.25-0.5-0.75-1-1.25-1.5-1.75-2%). Les échantillons de sable renforcé au caoutchouc ont été comparés au sable non renforcé (sans caoutchouc). Pour chaque pourcentage du caoutchouc, le sable a été cisailé sous trois contraintes normales (100,200 et 400KPa),

D'après les résultats obtenus, on peut remarquer que l'incorporation du caoutchouc a un effet considérable sur le comportement du sable. Par mieux comprendre sur l'effet du caoutchouc sur la courbe "résistance-déplacement", nous allons interpréter les courbes selon les points suivants :

- l'allure de la courbe.
- la résistance au pic et son déplacement correspondant.

L'incorporation du caoutchouc change l'allure de la courbe aussi bien à l'état lâche que l'état dense. Les déformations s'évaluent plus lentement en présence du caoutchouc, ce qui signifie que l'existence des fibres dans le sable réduit la cinétique de développement de déformations et rend la rupture plus ductile. Cette dernière propriété est souhaitable pour les ouvrages géotechniques.

Par ailleurs, la présence du caoutchouc améliore la contrainte de cisaillement maximale (pic de la courbe). De plus, le déplacement maximum au pic augmente avec l'augmentation du caoutchouc.

Le tableau ci-dessous représente les résistances maximales obtenues, selon la compacité du sable et le dosage en caoutchouc.

Tableau(IV.1) : Les résultats d'essais de cisaillement

Pourcentages du caoutchouc (%)	Contrainte verticale (KPa)	L'état lâche (SL)		L'état dense (SD)	
		Résistance au cisaillement (KPa)	Déplacement horizontal (mm)	Résistance au cisaillement (KPa)	Déplacement horizontal (mm)
0	100	83,33	2,089	107,22	1,625
	200	164,72	1,599	200,55	1,773
	400	327,5	2,184	339,16	1,946
0,25	100	97,5	2,161	122,22	2,055
	200	177,22	2,72	201,11	1,845
	400	329,44	2,062	344,16	3,634
0,5	100	89,44	3,287	121,38	2,337
	200	176,38	2,766	205,55	2,334
	400	332,5	2,84	351,94	2,278
0,75	100	91,11	3,287	125	2,552
	200	180	2,843	220,27	2,366
	400	338,05	2,295	360	2,075
1	100	94,72	2,495	124,72	1,413
	200	181,11	2,456	221,66	1,711
	400	324,44	3,159	376,38	1,824
1,25	100	98,33	3,407	123,05	2,05
	200	184,44	2,201	225	1,948
	400	339,72	2,39	376,94	1,82
1,5	100	99,16	2,959	135	1,081
	200	183,61	3,177	243,33	1,028
	400	338,33	2,779	374,44	2,445
1,75	100	100	3,028	141,11	2,31
	200	185,83	3,35	230,55	2,589
	400	333,88	3,235	355	1,862
2	100	102,5	4,154	140,55	2,477
	200	185	3,687	231,11	2,228
	400	345,83	3,466	380,83	2,468

IV.2.2. Effet de la densité sur la résistance de cisaillement

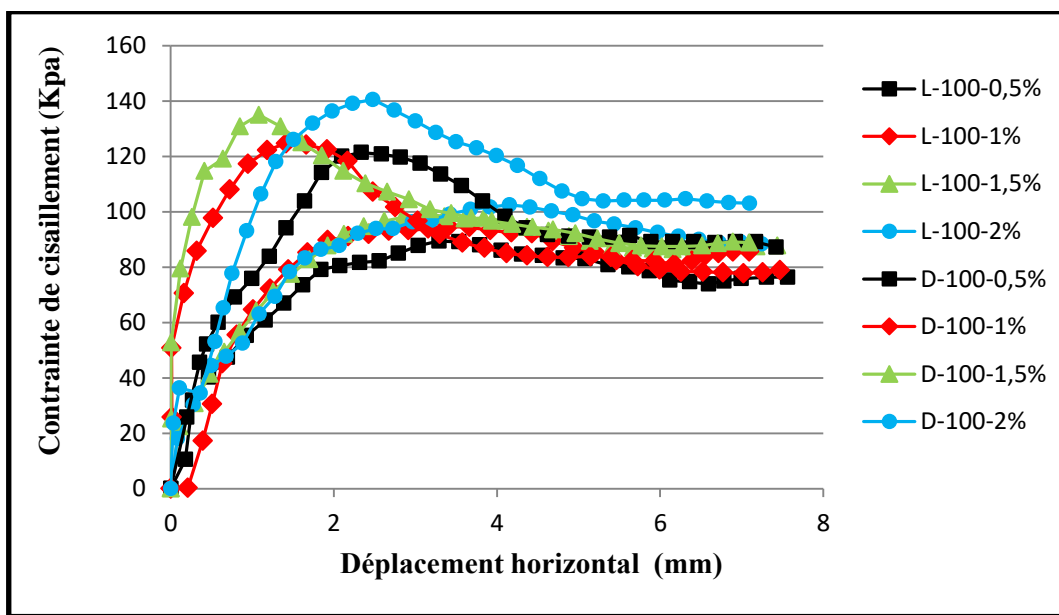


Fig. (IV.7) : Effet de la densité sur la résistance au cisaillement du sable de dune ($\sigma_n=100\text{KPa}$)

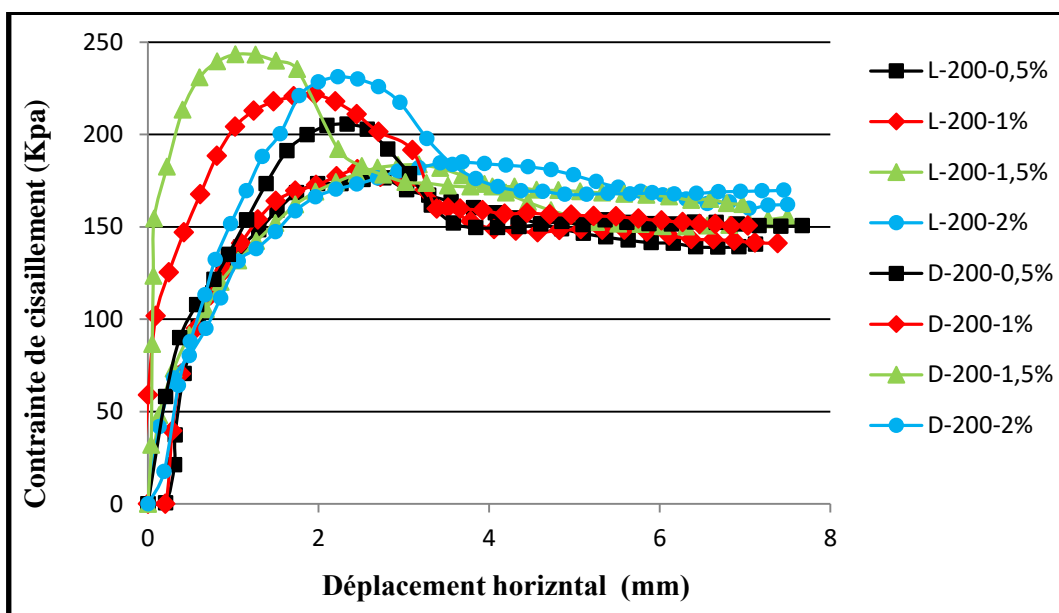


Fig. (IV.8) : Effet de la densité sur la résistance au cisaillement du sable de dune ($\sigma_n=200\text{KPa}$)

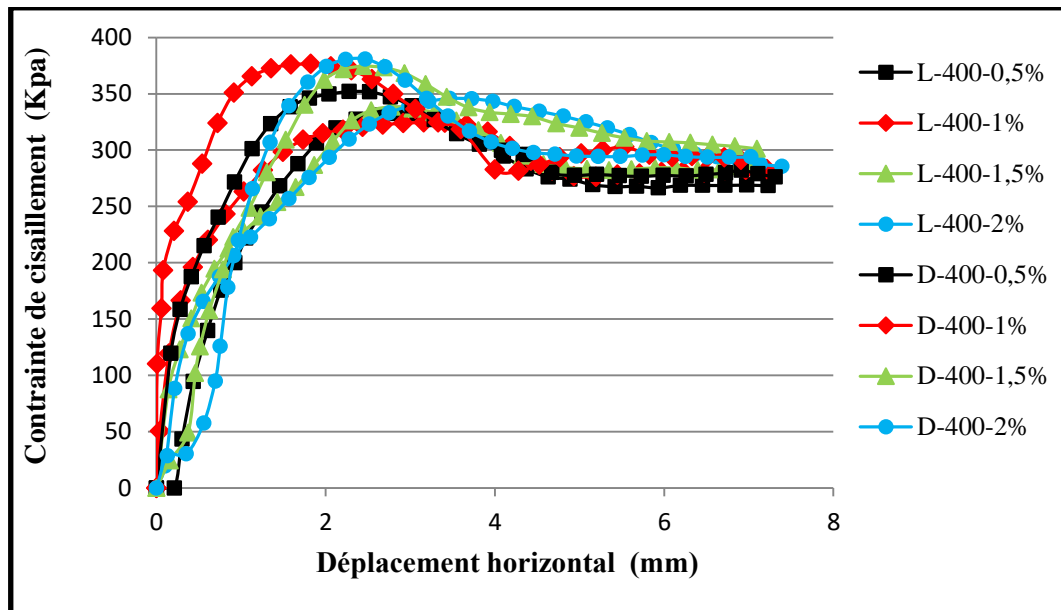


Fig. (IV.9) : Effet de la densité sur la résistance au cisaillement du sable de dune ($\sigma_n=400\text{KPa}$)

➤ Analyse de résultats

Les figures ci-dessous représentent l'effet de la densité sur la résistance au cisaillement du sable à l'état lâche et à l'état dense. Comme été mentionné précédemment, nous avons réalisé des essais de cisaillement direct aux différents pourcentages de caoutchouc (de 0,25 à 2%) et à deux états de compacité (lâche et dense). Chaque pourcentage du caoutchouc a été soumis aux trois contraintes normales (100,200 et 400KPa),

L'analyse complète des résultats du tableau (IV.1) et des courbes des figures (IV.7), (IV.8) et (IV.9), montrent que la résistance au cisaillement à l'état dense est supérieure de l'état lâche. Les courbes de cisaillement du sable renforcé confirment les courbes typiques de comportement des sols sableux. A l'état lâche la courbe de cisaillement est caractérisée par une allure asymptotique, tandis que, à l'état dense la courbe est caractérisée par un pic très prononcé suivi par palier horizontal aux grands déplacements. Par ailleurs, l'effet des fibres sur les courbes de cisaillement est plus remarqué au cas du sable dense que le sable lâche. Puisque le mécanisme du comportement des sols sableux est basé sur le niveau de densification du squelette granulaire.

IV.2.3. Effet des fibres caoutchouteuses sur l'angle de frottement interne

La résistance au cisaillement des sols sableux est basée uniquement sur le frottement entre les grains constituant le squelette granulaire dont le seul paramètre déterminé à partir de la courbe intrinsèque est l'angle de frottement interne, définit comme la pente de la droite dans le plan de contraintes principales ou plan de Mohr (Figure IV. 10). La courbe de figure (IV.11) et

le Tableau (IV.2) montrent l'influence des fibres de caoutchouc sur l'angle de frottement interne du sable de Boussaâda.

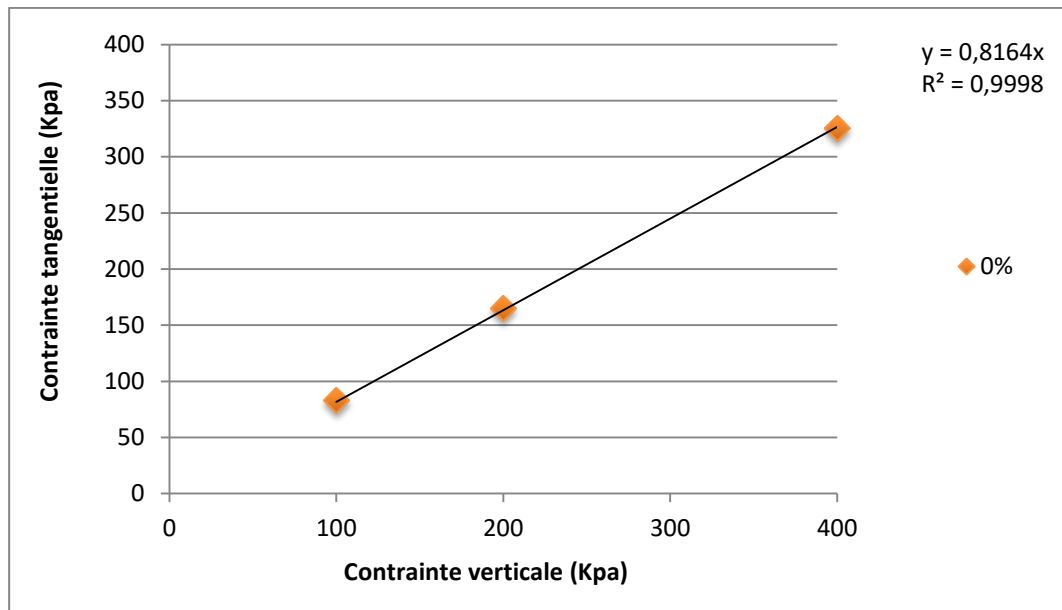


Fig. (IV.10) : Courbe intrinsèque du sable des dunes à l'état lâche.

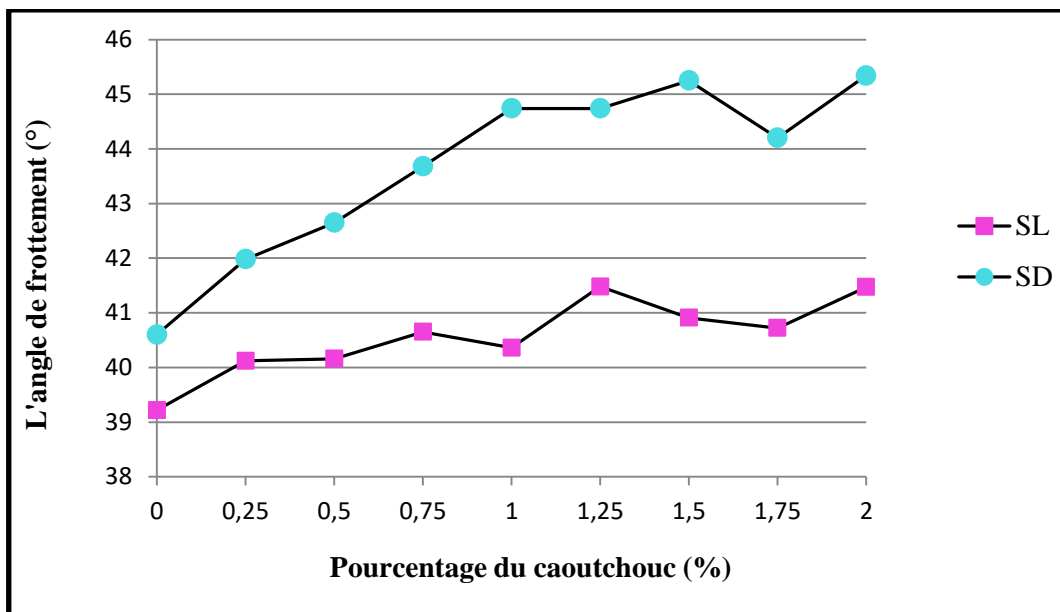


Fig. (IV.11) : Evolution d'angle de frottement en fonction des fibres caoutchouteuses

Tableau(IV.2) : La variation d'angle de frottement de sable des dunes.

Pourcentages des fibres du caoutchouc (%)	L'angle de frottement ϕ (°)	
	L'état lâche	L'état dense
0	39,22	40,6
0,25	40,12	41,98
0,5	40,16	42,65
0,75	40,65	43,68
1	40,36	44,74
1,25	41,48	44,74
1,5	40,91	45,25
1,75	40,72	44,20
2	41,47	45,34

A base des résultats trouvées on peut remarquer que :

- L'angle de frottement interne augmente avec l'augmentation des concentrations des fibres de caoutchouc dans le sable, aussi bien à l'état dense qu'à l'état lâche.
- La cinétique de développement de l'angle de frottement avec l'augmentation du dosage en caoutchouc est beaucoup plus élevée à l'état dense qu'à l'état lâche.

A partir des résultats obtenus, on peut conclure que :

- L'augmentation du dosage de caoutchouc dans le sable change significativement la pente de la courbe intrinsèque du sable (chaque augmentation du caoutchouc induit une augmentation de l'angle de frottement interne ϕ).
- L'effet des fibres de caoutchouc est plus envisagé à l'état dense qu'à l'état lâche, puisque le comportement des sols sableux est basé sur le mécanisme enchevêtrement-désenchevêtrement du squelette granulaire, plus ce dernier est serré plus que le frottement est grand et par conséquent la résistance est élevée. L'existence de la fibre dans le squelette granulaire empêche le déplacement relatif entre les grains créant ainsi un frottement supplémentaire.

CONCLUSION GENERALE

La valorisation des déchets caoutchouteux dans les applications du génie civil, notamment dans les bétons sous forme de granulats ou dans les sols comme des renforts, est considérée comme une solution intéressante sur les plans économique et environnemental, en effet, elle permet de réduire les impacts écologiques des déchets de caoutchouc sur l'environnement et la santé de l'être humain, d'une part, et de réduire les besoins en matière première, d'autre part.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à étudier l'effet des fibres de caoutchouc sur les propriétés mécaniques d'un sol sableux (sable de Boussaâda). Ces fibres ont été ajoutées au sable en différents dosages 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1.75 et 2%. Puisque le comportement des sols sableux est fortement lié à la densité du sable et à la contrainte de confinement appliquée, chacun de ses pourcentages a été soumis aux trois contraintes normales (100, 200 et 400 kPa), et à deux niveaux de compacité (lâche et compacte). La démarche expérimentale entreprise consiste en l'étude de l'influence des fibres incorporées sur les propriétés mécaniques du sable.

D'après les résultats obtenus les principales conclusions qu'on peut tirer de cette étude sont:

- L'incorporation du caoutchouc a un effet considérable sur le comportement du sable.
- Les déformations s'évaluent plus lentement en présence du caoutchouc, ce qui signifie que l'existence des fibres dans le sable réduit la cinétique de développement des déformations et rend la rupture plus ductile.
- La résistance au cisaillement et le déplacement maximale augmente avec l'augmentation du caoutchouc.
- L'existence de la fibre dans le squelette granulaire empêche le déplacement relatif entre les grains créant ainsi un frottement supplémentaire.

En résumé, le renforcement des sables par des renforts d'origine caoutchouteuse, permet non seulement de créer une source supplémentaire pour absorber certaines quantités de ces déchets industriels, mais également d'améliorer les propriétés mécaniques du sable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

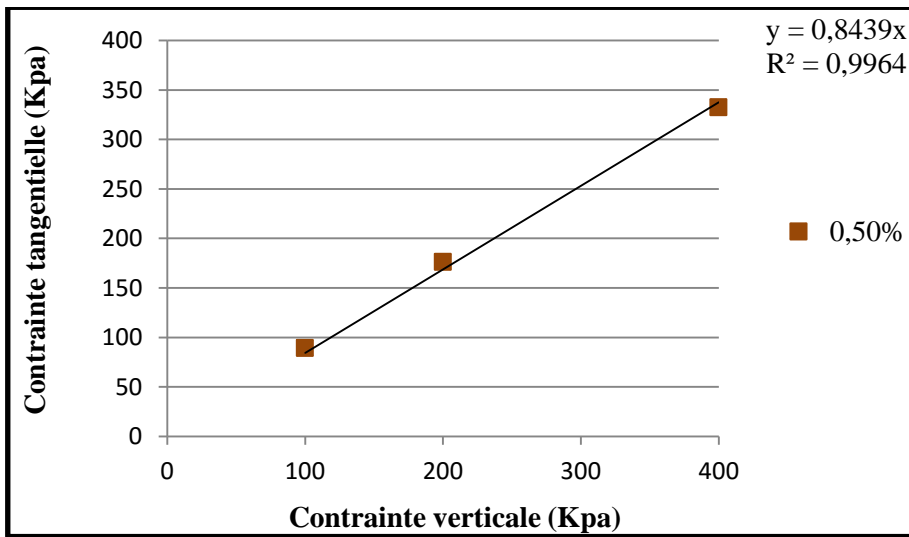
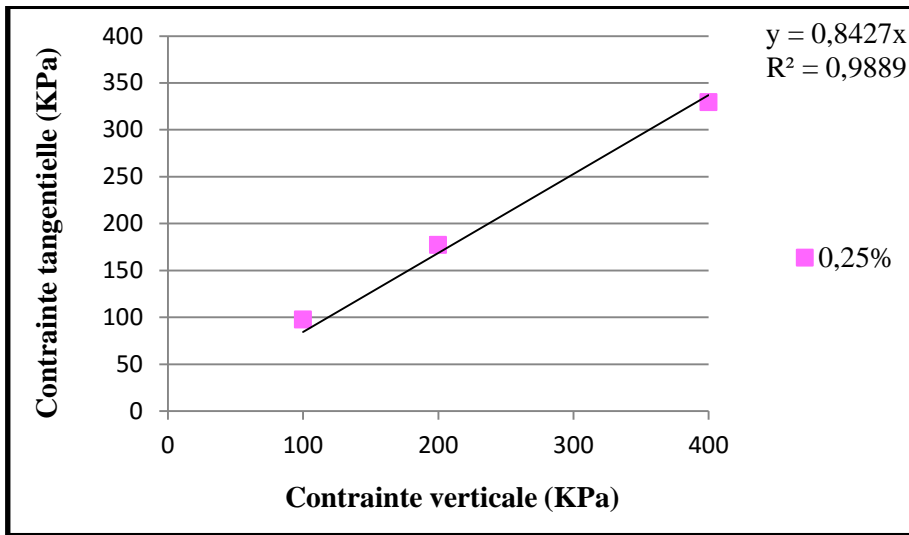
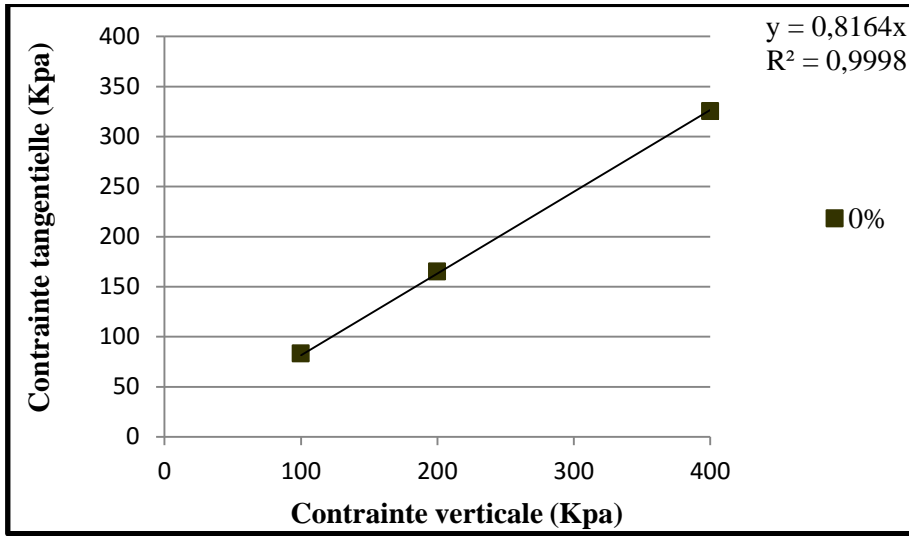
- [1] BOULIFA Ridha, « comportement d'éléments structuraux en béton armé au cisaillement: recherche de critères de rupture en relation avec le développement d'un essai approprié », Thèse de doctorat en sciences, Université de Constantine 1, janvier 2014.
- [2] <http://www.civil-usherbrooke-ca>.
- [3] CHIKHI Kamra, « Etude expérimentale des matériaux non saturés au cisaillement et l'oedomètre », mémoire de Magister, université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [4] IHCENE LAMRI, « Etude du comportement d'un sol cohérent sous chargement monotonique et cyclique » mémoire de Magistère, université 20 aout 1955 –Skikda, 2008.
- [5] LABOUAZDA Brahim, « Traitement d'un sable des dunes à forte teneur en ciment », mémoire de Master, université de M'sila, 2011.
- [6] BOUTALEB Amina, « L'effet de la haute température sur le comportement d'un béton compacté au rouleau avec ajouts des déchets pneumatiques », mémoire de Master, université de M'sila, 2013.
- [7] BENSACI Hamza-MEBARKIA Yacine, « Amélioration de performance d'un béton compacté au rouleau routier contenant des particules en polymère », mémoire de fin d'étude, université de Bordj Bou Arreridj, 2014.
- [8] ANDJELKOVICH, D.A., TAULBEE, J.D. et Symons, M.J., 1976: « Mortality experience in a cohort of rubber workers, 1964-1973 », Journal of Occupational Medicine, vol. 18, no 6, pp. 386-394.
- [9] <http://www.le.caoutchouc.com/nos-compétences/propriétés>.
- [10] <http://www.arecpc.com/giude/dib/pneu>.
- [11] Habib Trouzinea, b, AISSA Asrouna, Nasser Asrouna, FARID Bel abdelouhabe, Nguyen Thanh long, Problématique des pneumatiques usagés en Algérie Revue « nature & technologie » .n° 05/Juin 2011.
- [12] M. HO Anh Cuong, « Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface » Thèse doctorat de l'université de Toulouse, 2010.

[13] <http://www.caribriskcluster.org/mission-jamaïque-numéro-3-pneusol/-mai-2013>.

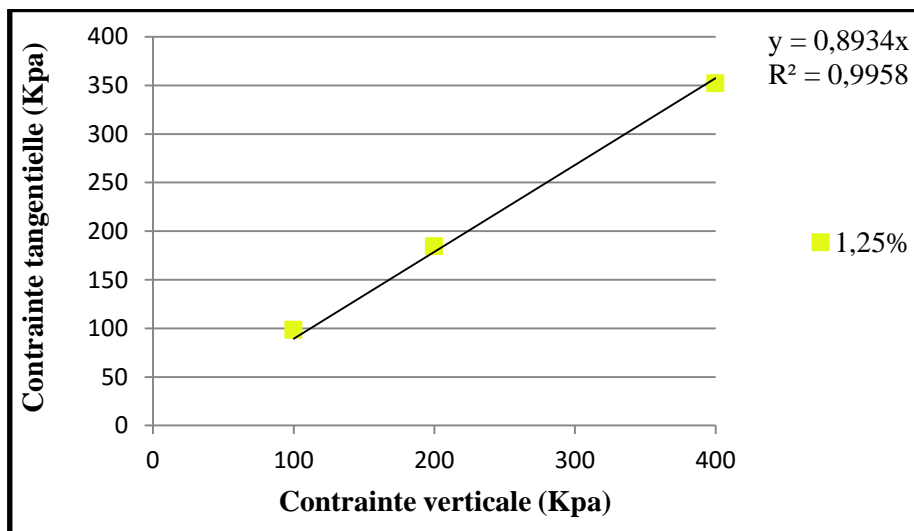
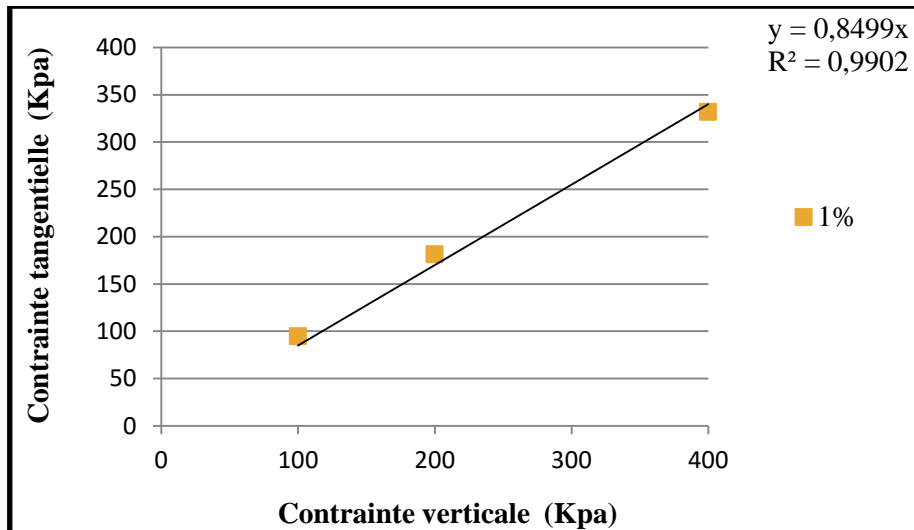
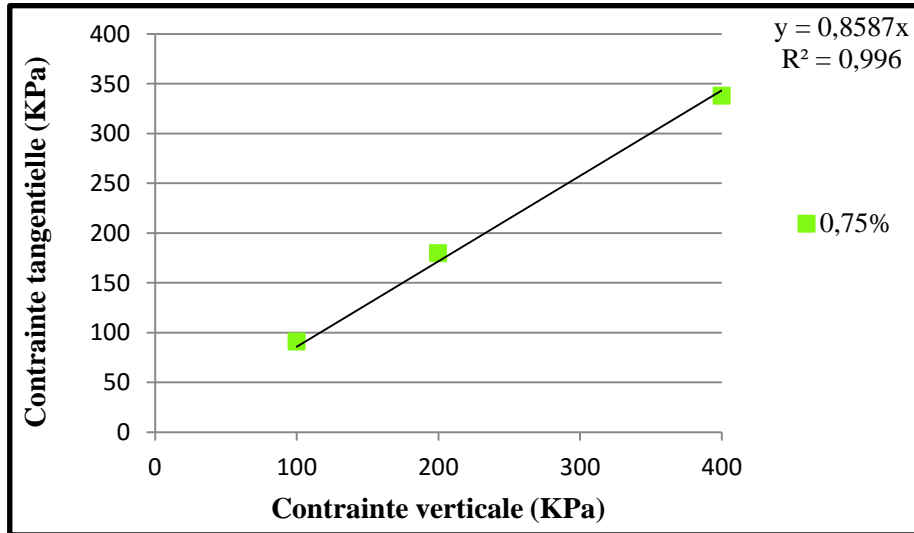
[14] MEDDAH Abdelaziz, « caractérisations d'un béton compacté routier contenant des déchets caoutchouteux », Thèse Doctorat. Ecole nationale polytechnique d'Alger, 2015.

[15] MEDDAH Abdelaziz, « Etude du comportement d'un sable de dune sous sollicitations triaxiales » mémoire de Magister, université de M'sila, 2008.

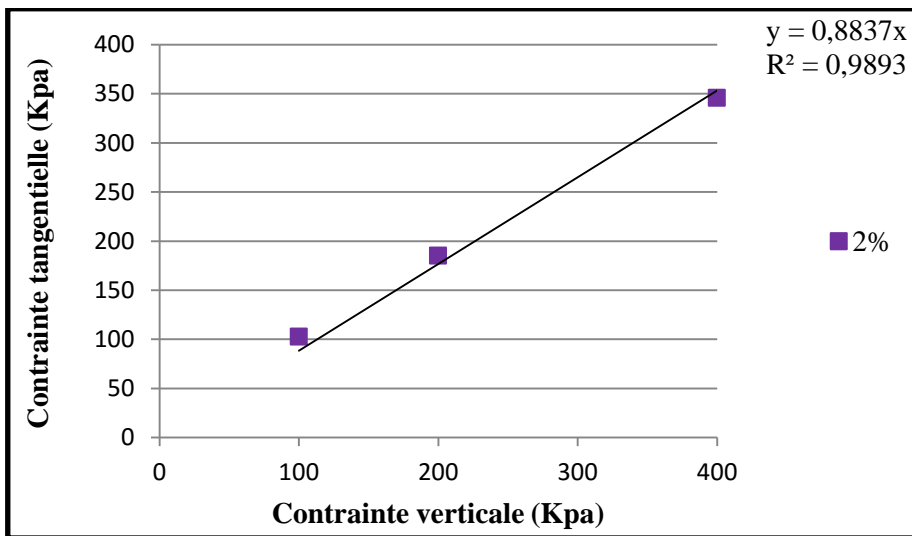
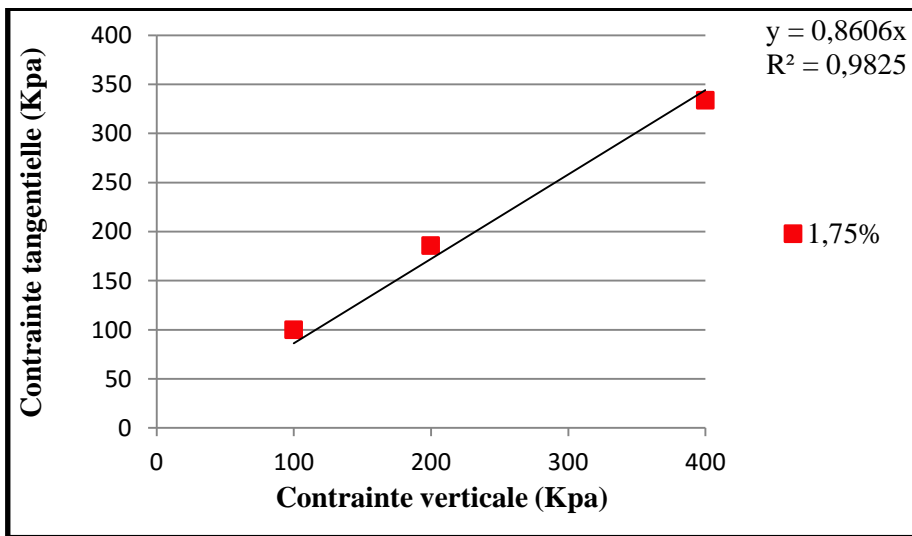
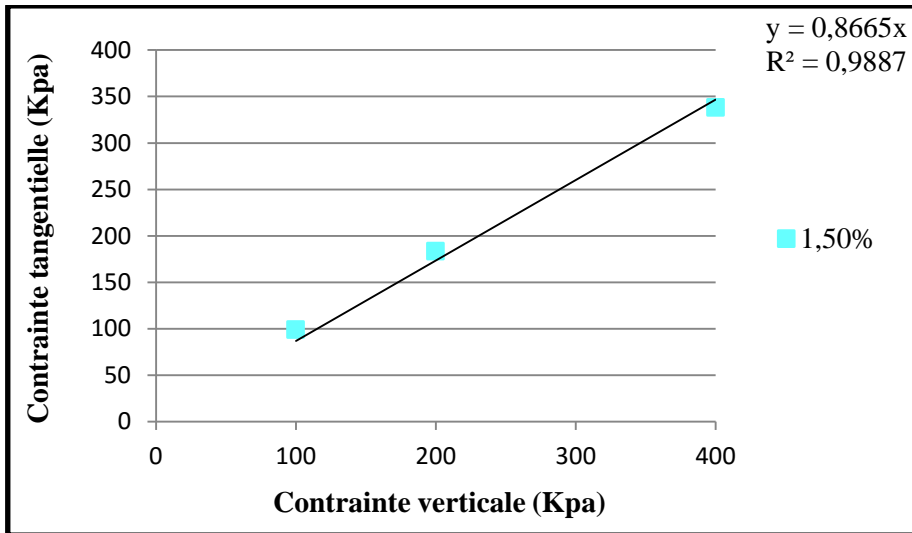
Les courbes intrinsèques du sable des dunes à l'état lâche et dense avec différents pourcentages des fibres caoutchouteuses



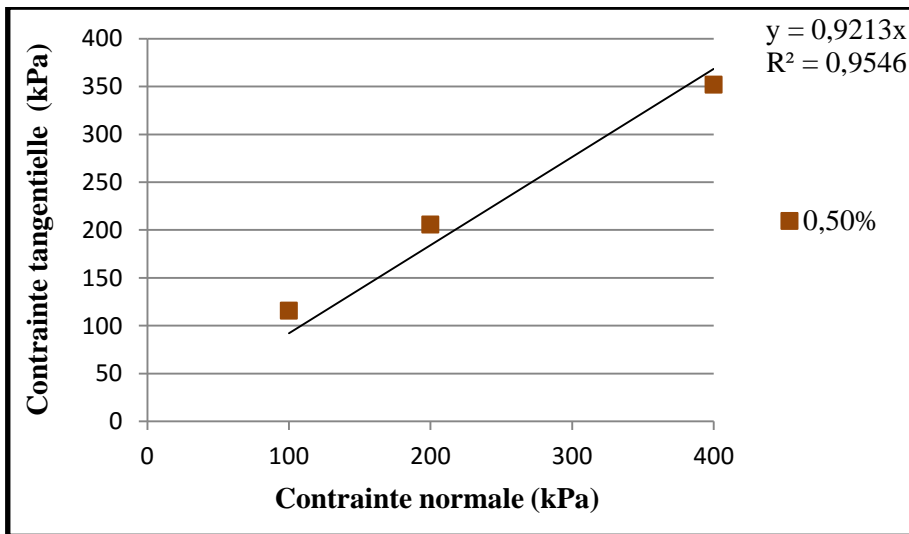
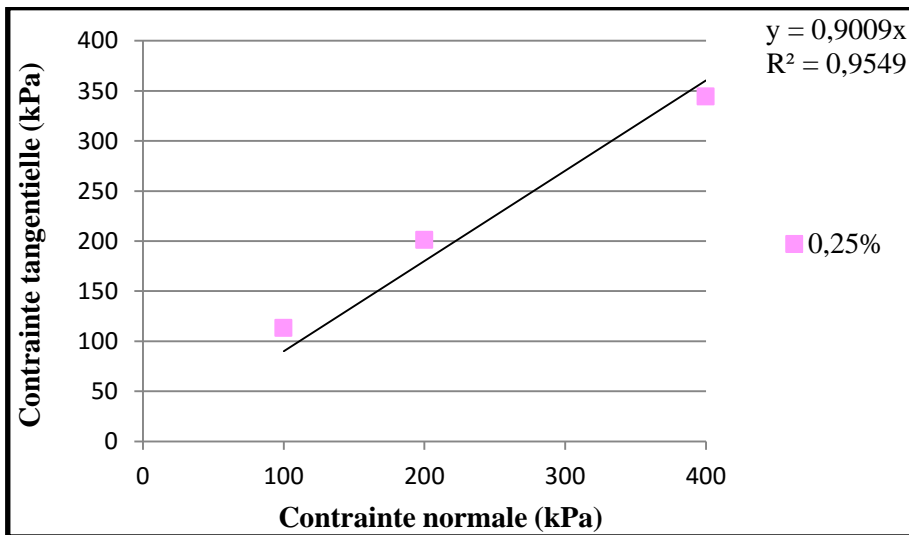
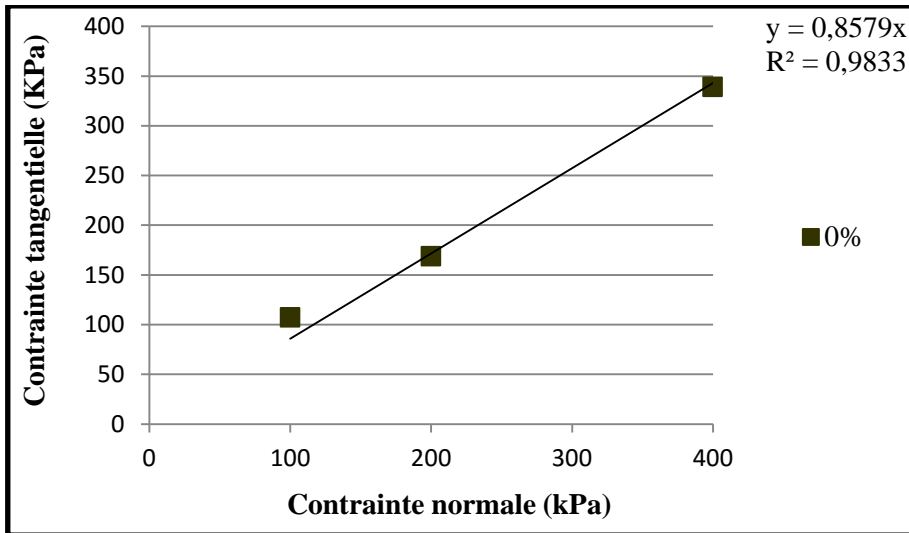
Annexes



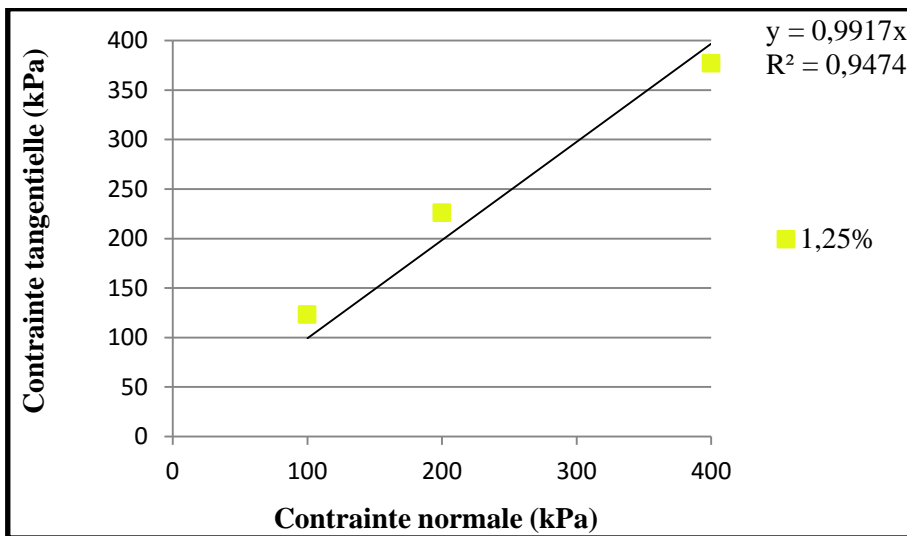
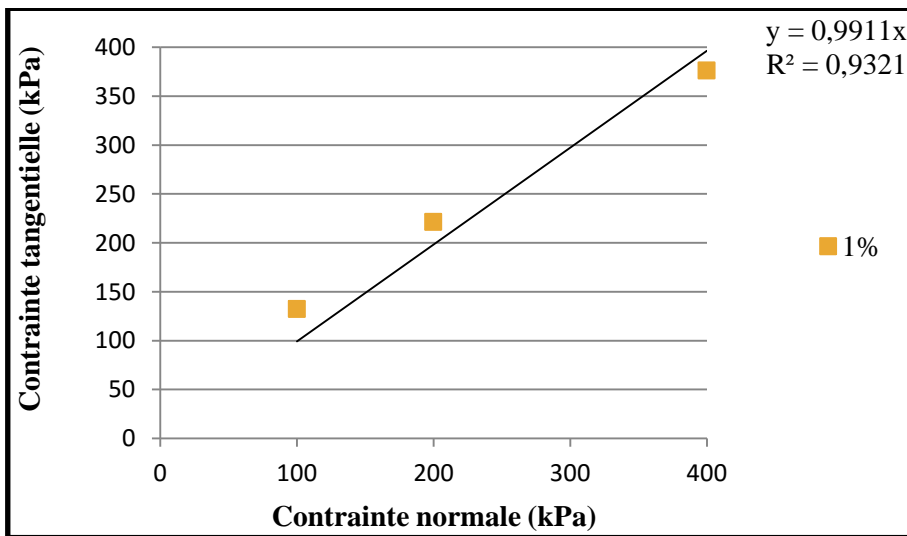
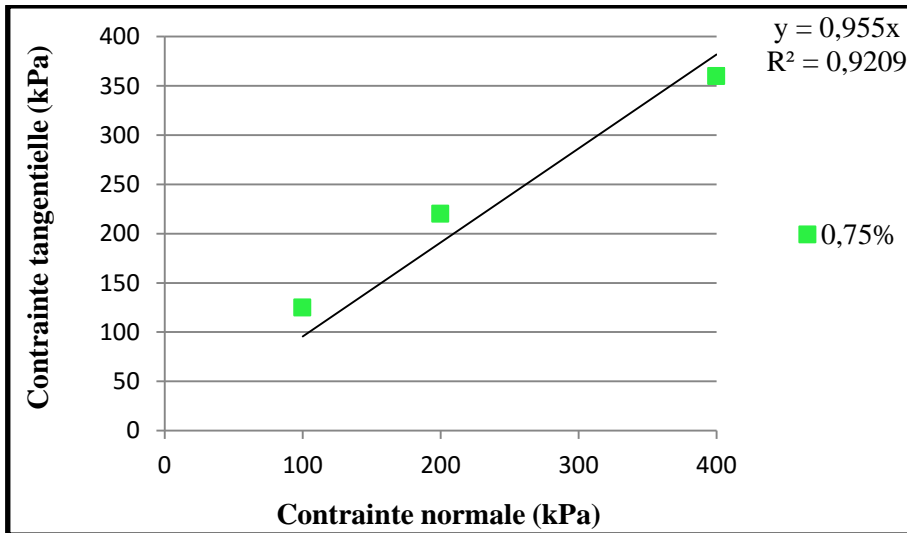
Annexes



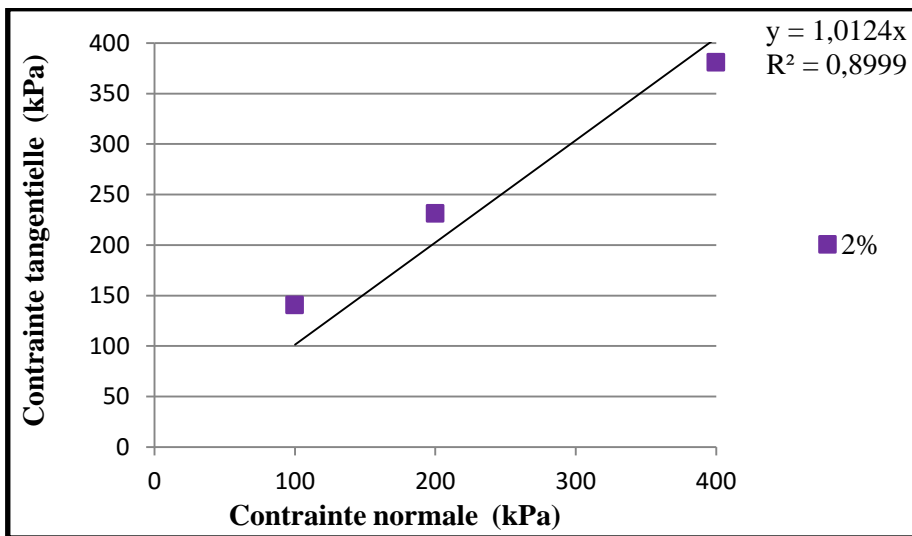
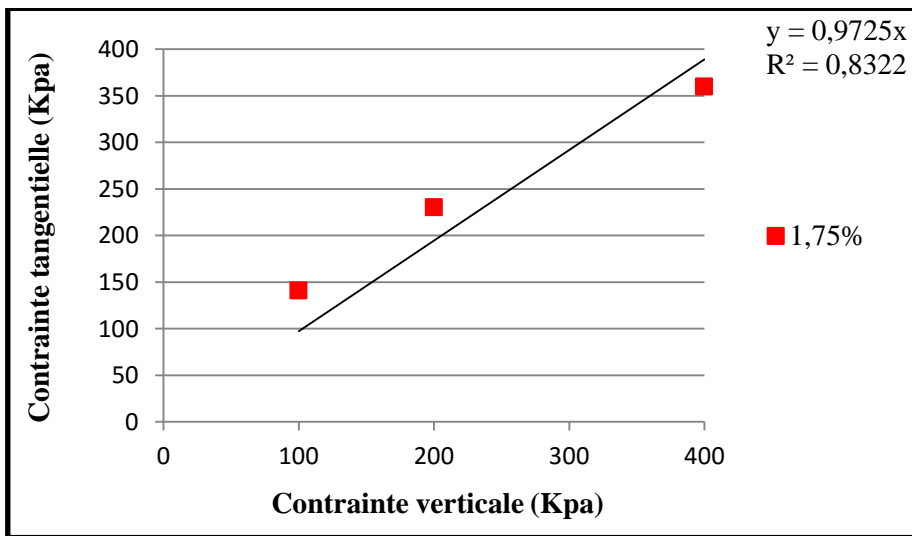
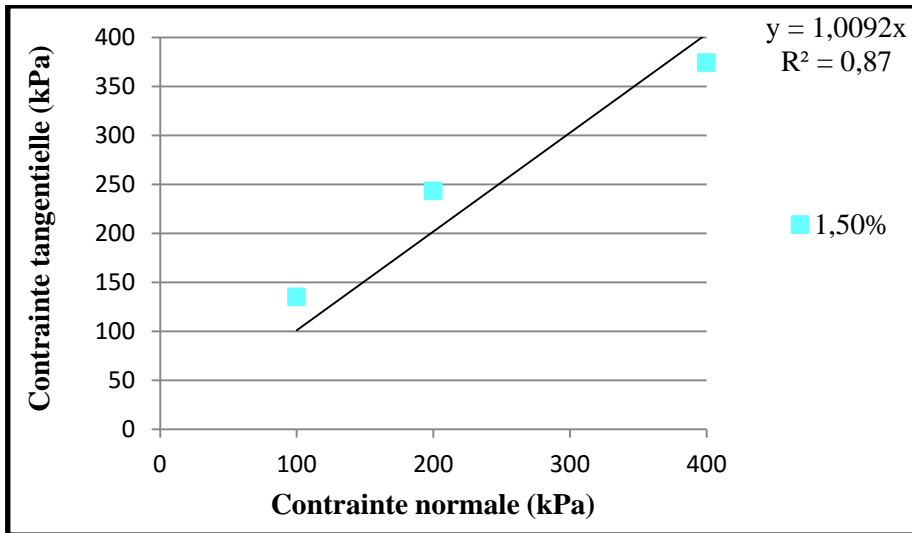
Annexes



Annexes



Annexes



ملخص

في هذه الدراسة، يقترح طريقة بديلة وصديقة للبيئة لتعزيز التربة الغير متماسكة. هذه التقنية تعتمد على استخدام النفايات المطاطية بشكل ألياف موزعة عشوائيا في رمال الكثبان. أضيفت الألياف المطاطية للرمال بنسب مختلفة: 0,25 - 0,5 - 0,75 - 1 - 1,25 - 1,5 - 1,75 - 2% ويتم التعبير عن هذه النسب نسبة إلى الوزن الجاف من الرمل. يقوم البرنامج التجريبي على دراسة تأثير الألياف المطاطية على خصائص قوة القص للرمال. بالإضافة إلى الفوائد البيئية من النهج المقترح في هذه الدراسة، إنشاء تطبيق جديد يسمح باستيعاب كمية من النفايات المطاطية، فقد بينت النتائج أن إدراج الألياف المطاطية في التربة الرملية يحسن من قوة القص ويجعل الرمل أكثر مرونة.

الكلمات المفتاحية: تعزيز التربة الغير متماسكة, الألياف المطاطية, التربة الرملية, مقاومة القص.

Résumé

Dans cette étude, une méthode environnementale pour le renforcement des sols pulvérulents est proposée. Cette technique consiste en l'utilisation des déchets caoutchouteux sous forme de fibres aléatoirement distribuées dans un sable de dunes. Ces fibres ont été incorporées dans le sable en différents pourcentages: 0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25, 1.5, 1.75 et 2%. Ces pourcentages sont exprimés par rapport à la masse sèche du sable. Le programme expérimental entrepris consiste à étudier l'effet des fibres caoutchouteuses sur les caractéristiques de résistance du sable. En plus de l'avantage environnemental de l'approche proposée dans cette étude, la création d'une nouvelle application qui permette d'absorber une quantité de déchets caoutchouteux, les résultats obtenus montrent que l'inclusion de fibres en caoutchouc dans un sol sableux permet d'améliorer la résistance au cisaillement et d'apporter plus de ductilité au sable.

Mots clés: Renforcement des sols pulvérulents, fibres caoutchouteuses, sol sableux, résistance au cisaillement,

Abstract

In this study, an alternative and environmentally friendly method for the reinforcement of sandy soils is proposed. This technique consist using randomly distributed rubber fibers for improving the engineering properties of sand. The rubber fibers were added to the sand with different percentages: 0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25; 1.5; 1.75 and 2%. These rates are calculated as percentages of the dry weight of sand. The experimental program carried out on reinforced sand is consisted to investigate the effect of the incorporated rubberized fibers on the shear strength properties of sand. In addition to the environmental advantages of the approach proposed in this study, creating a new application for valorizing of rubber waste, the obtained results show that the inclusion of rubber fibers in sandy soil allowed improving the mechanical properties of sand and making more ductile behavior of sand.

Keywords: Reinforcement of sandy soils, the rubber fibers, sand, mechanical properties.