

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité: Génie Civil

Option: Structures

Présenté par:

BOUAZZA Mostéfa

BOUKENINE Abdelhafid

*Sujet du mémoire*

***Etude du comportement d'un sol non  
cohérent renforcé par des fibres naturelles  
et synthétiques***

*Soutenu publiquement le 30/06/2022 devant le jury composé de:*

M. DJEBLI	Benyagoub	Président
M. KRIM	Abdallah	Rapporteur
M. KERROUM	Nadir	Examineur
M. RABAHI	Abderezak	Examineur

***Promotion: 2021-2022***

## Dédicaces

*Nos chers parents Dieu les protège, ceux qui ont été toujours là pour nous, c'est Grâce à eux ce que nous sommes.*

*Nos sœurs et nos frères.*

*Tous nos amis ainsi que Tous nos collègues de Département de Génie Civil En un mot, toutes nos familles, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.*

## **Remerciements**

*Nous tenons à remercier tous d'abord ALLAH, qui nous a donné la force de faire ce modeste travail.*

*Nous remercions vivement notre encadreur Dr. Krim Abdallah pour nous avoir confié ce travail et pour son aide, sa patience et sa sympathie, ses encouragements et ses conseils précieux.*

*Nous remercions tous nos professeurs de la faculté des sciences et de la technologie et du Département de génie civil qui ont développés notre formation scientifique.*

*Nous remercions vont aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail, Enfin à tous ceux et celles qui nous a soutenues ou encouragés.*

*Sans oublier nos collègues ; les étudiants de 2èmeAnnée MASTER Génie Civil.*

## Résumé

Ce travail présente une étude en laboratoire de l'influence de l'ajout des fibres synthétiques (fibres de verre et fibres de polypropylène) et naturelles (fibres de chanvre) sur le comportement mécanique d'un sable d'oued (sable de Chlef). Une série d'essais de cisaillement direct a été réalisée sur un mélange sable-fibres de verre variant de 0, 0.25, 0.5, 0.75 et 1%. Les essais ont été réalisés sur des échantillons de sable moyens ( $D_r = 50\%$ ) et denses ( $D_r = 80\%$ ), sous des contraintes normales de 50, 100 et 200 kPa. Les résultats des essais montrent que l'ajout des fibres influence d'une manière considérable sur la résistance au cisaillement du mélange sable-fibres, en effet, cette résistance augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres et la contrainte normale appliquée jusqu'à un seuil de 0.5% pour les fibres de verre et 0.75% pour les fibres de polypropylène et de chanvre. Au-delà de ce seuil, on note une diminution de cette résistance. L'angle de frottement interne mobilisé et la cohésion sont influencés d'une manière significative par l'ajout des fibres.

**Mots-clés:** Sable, boîte de cisaillement direct, comportement mécanique, fibre synthétique, fibre naturelle, résistance.

## ملخص

يقدم هذا العمل دراسة معمليّة لتأثير إضافة الألياف الاصطناعيّة (الألياف الزجاجية والبولي بروبيلين) والألياف الطبيعيّة (ألياف القنب) على السلوك الميكانيكي لرمال الوادي (رمال الشلف). تم إجراء سلسلة من اختبارات القص المباشر على خليط من الألياف الزجاجية الرملية تتراوح من 0 ، 0.25 ، 0.5 ، 0.75 و 1%. أجريت الاختبارات على عينات رمل متوسطة ( $Dr = 50$ ) (وكثيفة ( $Dr = 80$ ) (تحت ضغوط طبيعيّة 50 و 100 و 200 كيلو باسكال. تظهر نتائج الاختبار أن إضافة الألياف لها تأثير كبير على مقاومة القص لخليط الألياف الرملية، في الواقع، تزداد هذه المقاومة مع زيادة نسبة الألياف والضغط الطبيعي المطبق حتى عتبة 0.5% لألياف الزجاج و 0.75% للبولي بروبيلين وألياف القنب. بعد هذه العتبة ، هناك انخفاض في هذه المقاومة. تتأثر زاوية الاحتكاك الداخلي المعبأة والتماسك بشكل كبير بإضافة الألياف.

الكلمات المفتاحية: الرمل ، صندوق القص المباشر ، السلوك الميكانيكي ، الألياف الاصطناعيّة ، الألياف الطبيعيّة ، القوة.

## **Abstract**

This work presents a laboratory study of the influence of the addition of synthetic fibers (fiberglass and polypropylene fibers) and natural (hemp fibers) on the mechanical behavior of wadi sand (Chlef sand). A series of direct shear tests were carried out on a sand-fiberglass mixture varying from 0, 0.25, 0.5, 0.75 and 1%. The tests were carried out on medium ( $D_r = 50\%$ ) and dense ( $D_r = 80\%$ ) sand samples under normal stresses of 50, 100 and 200 kPa. The test results show that the addition of fibers has a considerable influence on the shear strength of the sand-fiber mixture, in fact, this resistance increases with the increase in the percentage of fibers and the normal stress applied up to a threshold of 0.5% for glass fibers and 0.75% for polypropylene and hemp fibers. Beyond this threshold, there is a decrease in this resistance. The angle of internal friction mobilized and the cohesion are significantly influenced by the addition of fibers.

**Keywords:** Sand, direct shear box, mechanical behavior, synthetic fiber, natural fiber, strength.

# Sommaire

**Dédicaces**

**Remerciement**

**Résumé**

**Sommaire**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des symboles**

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre 1: Différentes méthodes de renforcement, traitement et d'amélioration des sols</b>	
1.1. Introduction.....	5
1.2. Domaine et limites d'application des différentes techniques.....	5
1.3. Les méthodes d'amélioration des sols.....	6
1.3.1. Compactage par explosifs.....	6
1.3.2. Compactage dynamique.....	7
1.3.3. Vibrocompactage.....	7
1.3.4. Amélioration des conditions de drainage.....	8
1.3.5. Electro-osmose.....	9
1.4. Méthodes de traitement des sols.....	10
1.4.1. Déshydratation.....	10
1.4.2. Congélation.....	10
1.4.3. Traitement des sols par addition d'ajouts minéraux.....	11
1.4.3.1. Ciment.....	11
1.4.3.2. Chaux.....	13
1.4.3.3. Cendres volantes.....	13
1.4.3.4. Fumées de silice.....	14
1.5. Méthodes de renforcement des sols.....	15
1.5.1. Géosynthétiques.....	15
1.5.1.1. Fibres de polypropylène.....	16
a. Définition.....	16
b. Caractéristiques générales.....	17
c. Structure moléculaire et la chaîne.....	18
1.5.2. Inclusions rigides verticales.....	18
1.5.2.1. Principe de la méthode.....	18
1.5.2.2. Différents types des inclusions.....	19
1.5.2.3. Nappes de renforcement.....	19

1.6. Conclusion.....	20
----------------------	----

## **Chapitre 2: Renforcement par des fibres et paramètres influents**

2.1. Introduction.....	22
2.2. Renforcement des sols par fibres.....	22
2.3. Différents types de fibres.....	24
2.3.1. Fibres naturelles.....	24
2.3.2. Fibres synthétiques.....	25
2.4. Paramètres affectant le comportement des sols renforcés par fibres.....	26
2.4.1. Effet des propriétés du sol.....	26
2.4.1.1. Forme des particules.....	26
2.4.1.2. Taille des grains.....	26
2.4.2. Effet des propriétés des fibres.....	28
2.4.2.1. Forme des fibres.....	28
2.4.2.2. Longueur des fibres.....	30
2.4.2.3. Teneur en fibres.....	32
2.4.2.4. Rapport d'aspects.....	34
2.4.2.5. Orientation des fibres.....	36
2.4.3. Influence des conditions d'essai.....	38
2.4.3.1. Densité relative.....	38
2.4.3.2. Contrainte de confinement et contrainte normale.....	41
2.4.3.3. Teneur en eau.....	43
2.4.3.4. Technique de préparation des échantillons.....	45
2.5. Incidence des fibres sur le comportement des sols renforcés.....	47
2.5.1. Résistance au cisaillement.....	47
2.5.2. Rigidité.....	49
2.5.3. Résistance à la liquéfaction.....	50
2.5.4. Stabilité structurelle.....	53
2.6. Conclusion.....	55
<b>Chapitre 3: Dispositif expérimental, caractéristiques des matériaux utilisés et mode opératoire</b>	
3.1. Introduction.....	57
3.2. Dispositif expérimental.....	57
3.2.1. Essai a la boite de cisaillement.....	57
3.2.1.1. Principe de l'essai.....	57
3.2.1.2. Appareillage.....	59
3.3. Matériaux utilisés.....	60

3.3.1. Sol.....	60
3.3.2. Matériaux de renforcement.....	62
3.3.3. Détermination de la masse du sol.....	63
3.3.4. Préparation des échantillons.....	64
3.4. Conclusion.....	65

#### **Chapitre 4: Comportement mécanique des sols renforcés par des fibres**

4.1. Introduction.....	67
4.2. Contrainte de cisaillement.....	67
4.2.1. Etat moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ).....	67
4.2.2. Etat dense ( $D_r = 80\%$ ).....	69
4.3. Effet de la teneur en fibre sur les caractéristiques mécaniques.....	72
4.3.1. Etat moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ).....	72
4.3.2. Etat dense ( $D_r = 80\%$ ).....	74
4.4. Effet de la teneur en fibres sur la cohésion (C).....	77
4.5. Effet de la teneur en fibre sur l'angle de frottement ( $\phi$ ).....	78
4.6. Effet de la teneur en fibre sur le coefficient de renforcement ( $S_r$ ).....	79
4.7. Effet du type de fibres sur la contrainte de cisaillement.....	83
4.8. Effet du type de fibre sur les caractéristiques mécaniques.....	85
4.9. Effet du type de fibres sur la cohésion (C).....	86
4.10. Effet du type de fibre sur l'angle de frottement ( $\phi$ ).....	87
4.11. Effet du type de fibre sur le coefficient de renforcement ( $S_r$ ).....	88
4.12. Effet de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ) et de la densité relative ( $D_r$ ).....	89
4.13. Conclusion.....	91
<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>92</b>
<b>Références bibliographique.....</b>	<b>95</b>

## Liste des figures

### Chapitre 1

<b>Figure 1.1:</b> Limites et domaine de validité des techniques d'amélioration des sols.....	6
<b>Figure 1.2:</b> Atelier de compactage dynamique et impacts de la masse (Document Keller).....	7
<b>Figure 1.3:</b> Etapes du vibrocompactage des sables et graviers (Document Keller).....	8
<b>Figure 1.4:</b> Installation des drains.....	9
<b>Figure 1.5:</b> Eléctro-osmose.....	10
<b>Figure 1.6:</b> Traitement par congélation sous bâtiment pour tunnel de métro.....	11
<b>Figure 1.7:</b> Chantier de traitement du sol au ciment.....	12
<b>Figure 1.8:</b> Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage en ciment à différentes durées de cure (Haofeng et al. 2009).....	12
<b>Figure 1.9:</b> Chantier de traitement d'un sol à la chaux (France, 2009).....	13
<b>Figure 1.10:</b> Evolution des $R_c$ de boues de clapage: Mélange de ciment et de Fumées de silice (CSF), d'après (Asavapisit et al.2001).....	14
<b>Figure 1.11:</b> Evolution de $R_c$ de boues de clapage selon différents dosages en fumées de silice: 0, 5, 10 et 20% (Asavapisit et al, 2001).....	14
<b>Figure 1.12:</b> Variation du gonflement en fonction du temps ( $f = 0.25\%$ ).....	16
<b>Figure 1.13:</b> Les types de polypropylène.....	17
<b>Figure 1.14:</b> Principe de la méthode.....	19
<b>Figure 1.15:</b> Différentes dispositions du renforcement horizontal dans le matelas de transfert de charge, d'après (Briançon et al. 2004).....	20

### Chapitre 2

<b>Figure 2.1:</b> (a) Photomicrographie au MEB des particules de sol fixées sur la surface de la fibre après l'essai d'arrachement et (b) dessin d'esquisse des interactions mécaniques interfaciales entre les particules du sol et la fibre (Tang et al. 2010).....	23
<b>Figure 2.2:</b> Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Sathishkumar, 2014)..	24
<b>Figure 2.3:</b> Grains de sable et fibres de polyamide (0.3 mm de diamètre): (a) sable fin et (b) sable grossier (Al-Rafeai, 1991).....	27
<b>Figure 2.4:</b> Fibres maillées et lisses (Al-Rafeai 1991).....	28
<b>Figure 2.5:</b> Taux de contrainte principal à la rupture en fonction de la longueur des fibres et des mailles pour (a) sable fin et (b) sable moyen (Al-Refeai, 1991).....	29
<b>Figure 2.6:</b> Effet de la longueur de la fibre sur le déviateur de contrainte d'un composite sable sableux-fibre à une teneur de 1% (Bao et al. 2020).....	31

<b>Figure 2.7:</b> Relation contrainte-déformation de sable renforcé pour: (a) sable fin et (b) sable moyen. $\sigma_3 = 200$ kPa (AI-Refeai, 1991).....	32
<b>Figure 2.8:</b> Variation des caractéristiques mécaniques $C$ et $\phi$ en fonction de la teneur en fibres (Parakar et al. 2002).....	33
<b>Figure 2.9:</b> Valeur UCS du mélange sol- fibre par rapport au contenu en fibres (Li et al. 2018).....	34
<b>Figure 2.10:</b> Résistance à la compression non confinée d'un sol avec divers pourcentages et rapport d'aspects de fibre de coco (CF) (Ramesh et al. 2010).....	35
<b>Figure 2.11:</b> Effet de la teneur en fibres de verre et du rapport d'aspect sur la résistance à la rupture du sable de Muskegon aux contraintes de confinement faibles et élevées (Maher et Gray, 1990)....	35
<b>Figure 2.12:</b> Classification et illustration du mécanisme de renforcement des fibres du sol (Gowthaman et al. 2018).....	36
<b>Figure 2.13:</b> Représentation schématique d'une unité de fibre distribuée de façon aléatoire à: (a) l'étape initiale (b) l'étape de déformation due au chargement, où l'effet de l'enclenchement du frottement et de la liaison d'interface induit la mobilisation de la contrainte de traction sur l'unité de fibre (Gowthaman et al. 2018).....	37
<b>Figure 2.14:</b> Courbes de contrainte-déformation horizontale déformation volumique pour un sable fin renforcé pour différentes orientations de fibre (Michalowski et Cermak, 2002).....	38
<b>Figure 2.15:</b> Effet du confinement et de la densité sur la résistance au cisaillement du sable humide ( $w = 3\%$ ) renforcé par une teneur volumique en fibres de 0.3%: (a) contrainte de cisaillement en fonction de la déformation horizontale, (b) effet de la pression de confinement et de la densité relative sur la déformation verticale, (c) courbe intrinsèque de l'équation $\tau = \sigma \operatorname{tg}\phi + c$ (Benessalah et al. 2015).....	39
<b>Figure 2.16:</b> Résistance au cisaillement des échantillons non renforcés et renforcés avec trois densités différentes (Jin Liu et al. 2011).....	40
<b>Figure 2.17:</b> Résistance maximale au cisaillement des échantillons non renforcés et renforcés avec trois densités différentes (Jin Liu et al. 2011).....	40
<b>Figure 2.18:</b> Résistance résiduelle au cisaillement des échantillons non renforcés et renforcés avec trois densités différentes (Jin Liu et al. 2011).....	41
<b>Figure 2.19:</b> Résistance maximale au cisaillement en fonction de la teneur en fibres pour un sol renforcé à différentes pressions de confinement : (a) état lâche, (b) état dense (Khebizi et al. 2018).....	42
<b>Figure 2.20:</b> Évolution de la résistance maximale au cisaillement par rapport à la contrainte normale du composite sable-fibre-résidu de clinker (Bouaricha et al. 2017).....	43

<b>Figure 2.21:</b> Effet de la teneur en eau sur le comportement mécanique du sable renforcé à 200 kPa de contrainte verticale pour des échantillons: (a). Moyennement denses ( $D_r = 48\%$ ) et (b). Dense ( $D_r = 87\%$ ) (Benessalah et al. 2015).....	44
<b>Figure 2.22:</b> Variation de la résistance à la traction du sol en fonction de la teneur en eau (Li et al. 2014).....	45
<b>Figure 2.23:</b> Essais de compression triaxiale effectués sur des éprouvettes renforcées avec le type de fibre (1) et préparées avec les techniques MT et MV: (a) réponse de contrainte déportée déviatorique et (b) réponse de contrainte déformée volumétrique (Ibraim et al. 2012).....	46
<b>Figure 2.24:</b> Essais de compression triaxiale effectués sur des éprouvettes renforcées avec des fibres de type (2) et préparées avec les techniques MT et MV (Ibraim et al. 2012).....	47
<b>Figure 2.25:</b> Essais de compression triaxiale effectués sur des éprouvettes renforcées avec des fibres de type (3) et préparées avec les techniques MT et MV (Ibraim et al. 2012).....	47
<b>Figure 2.26:</b> Variations de la résistance au cisaillement des sable de Chlef et de Rass renforcés en fonction de (a) les teneurs en fibres et (b) la longueur des fibres (Bouaricha et al. 2017).....	48
<b>Figure 2.27:</b> Compression triaxiale; sable fin, fibres de polyamide, $\rho = 2,0\%$ , $\eta = 85$ , $l = 25,4$ mm: (a) courbes de contrainte-déformation; (b) contrainte volumétrique (Michalowski et Zhao, 1996)..	49
<b>Figure 2.28:</b> variation du CSR avec le nombre de cycles en considérant l'effet de la longueur de fibre $L_f = 6$ mm et $L_f = 12$ mm, respectivement ( $D_r = 50\%$ et $\sigma'_0 = 100$ kPa) (Eskisar et al. 2016)..	51
<b>Figure 2.29:</b> variation du CSR avec le nombre de cycles en considérant l'effet de la longueur de fibre $L_f = 6$ mm et $L_f = 12$ mm, respectivement ( $D_r = 70\%$ et $\sigma'_0 = 100$ kPa) (Eskisar et al. 2016)..	51
<b>Figure 2.30:</b> Énergie de capacité en fonction de la teneur en fibres pour différentes longueurs de fibres ( $CP = 200$ kPa et $D_r = 40\%$ ) (Amini et al. 2018).....	52
<b>Figure 2.31:</b> Énergie de capacité en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs en fibres ( $CP = 50$ kPa et $D_r = 40\%$ ) (Amini et al. 2018).....	53
<b>Figure 2.32:</b> Deux photos des échantillons lâches entièrement liquéfiés après cisaillement: (a)Sable; (b) sable + 0.4% de fibres (Jin Liu et al. 2011).....	54
<b>Figure 2.33 :</b> Deux photos des échantillons moyennement denses entièrement liquéfiés après cisaillement: (a) Sable; (b) Sable + 0.4% de fibres (Jin Liu et al. 2011).....	54
<b>Figure 2.34:</b> Deux photos des échantillons denses entièrement liquéfiés après cisaillement:(a) Sable; (b) Sable + 0.4% de fibres (Jin Liu et al. 2011).....	55

### Chapitre 3

<b>Figure 3.1:</b> Principe de l'essai de cisaillement rectiligne à la boîte : (a) En début de cisaillement, (b) En cours de cisaillement.....	58
<b>Figure 3.2:</b> Bâti de cisaillement.....	59

<b>Figure 3.3:</b> Boîte de cisaillement direct utilisée.....	60
<b>Figure 3.4:</b> Sable naturel d'Oued Chlef.....	61
<b>Figure 3.5:</b> Courbe granulométrique du sable naturel de Chlef.....	61
<b>Figure 3.6:</b> Vue microscopique des particules du sol de Chlef.....	61
<b>Figure 3.7:</b> Vues des fibres utilisés: (a) fibre de Polypropylène, (b) fibre de verre, (c) fibre de chanvre.....	63
<b>Figure 3.8:</b> Mélange de sable et de fibres: (a) fibres de polypropylène; (b) fibres de verre; (c) fibres de chanvre.....	64
<b>Figure 3.9:</b> Échantillons renforcés par fibres: (a) fibres de polypropylène; (b) fibres de verre; (c) fibres de chanvre.....	65

## Chapitre 4

<b>Figure 4.1:</b> Evolution de la résistance au cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) réalisés sur des échantillons non renforcés et renforcés par différents types de fibre sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$ kPa) et une densité relative moyenne ( $D_r = 50\%$ ). (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.....	68
<b>Figure 4.2:</b> Variations de la déformation volumique ( $\Delta V$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) effectué sur des échantillons non renforcés et renforcés par différents types de fibre sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$ kPa) et une densité relative moyenne ( $D_r = 50\%$ ). (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.....	69
<b>Figure 4.3:</b> Evolution de la résistance au cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) des échantillons non renforcés et renforcés par différentes types de fibre sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$ kPa) et une densité relative dense ( $D_r = 80\%$ ). (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.....	71
<b>Figure 4.4:</b> Variations de la déformation volumique ( $\Delta V$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) des échantillons non renforcés et renforcés par différents types de fibre sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$ kPa) et une densité relative dense ( $D_r = 80\%$ ). (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.....	72
<b>Figure 4.5:</b> Evolution de la résistance au cisaillement maximale ( $\tau_{max}$ ) en fonction du teneur en fibre ( $F_c$ ) et de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ) pour des échantillons préparés à l'état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.....	73
<b>Figure 4.6:</b> Evolution de la résistance au cisaillement maximale ( $\tau_{max}$ ) en fonction du teneur en fibre ( $F_c$ ) et de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ) pour des échantillons préparés à l'état dense ( $D_r = 80\%$ ), (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.....	75

<b>Figure 4.7:</b> Evolution de la cohésion ( $C$ ) en fonction de la teneur en fibre ( $F_c$ ) pour des échantillons renforcés par fibres à l'état moyennement dense et dense, (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.....	78
<b>Figure 4.8:</b> Evolution de l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) en fonction de la teneur en fibre ( $F_c$ ) pour des échantillons renforcés par fibres à l'état moyennement dense et dense, (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.....	79
<b>Figure 4.9:</b> Evolution du coefficient de renforcement ( $S_r$ ) en fonction de la teneur en fibre pour des échantillons renforcés par fibres à l'état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.....	81
<b>Figure 4.10:</b> Evolution du coefficient de renforcement ( $S_r$ ) en fonction de la teneur en fibre pour des échantillons renforcés par fibres à l'état dense ( $D_r = 80\%$ ), (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.....	82
<b>Figure 4.11:</b> Evolution de la résistance au cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) réalisés sur des échantillons non renforcés et renforcés par différents types de fibre sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$ kPa), (a) état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (b) (a) état dense ( $D_r = 80\%$ ).....	84
<b>Figure 4.12:</b> Variations de la déformation volumique ( $\Delta V$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) effectué sur des échantillons non renforcés et renforcés par différents types de fibre sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$ kPa), (a) état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (b) (a) état dense ( $D_r = 80\%$ ).....	85
<b>Figure 4.13:</b> Evolution de la résistance au cisaillement maximale ( $\tau_{max}$ ) en fonction du type de fibre et de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ), (a) état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (b) état dense ( $D_r = 80\%$ ).....	86
<b>Figure 4.14:</b> Evolution de la cohésion en fonction du type de fibre pour des échantillons renforcés par fibres, (a) état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (b) état dense ( $D_r = 80\%$ ).....	87
<b>Figure 4.15:</b> Evolution de l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) en fonction du type de fibre pour des échantillons renforcés par fibres, (a) état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (b) état dense ( $D_r = 80\%$ ).....	88
<b>Figure 4.16:</b> Evolution du coefficient de renforcement ( $S_r$ ) du type de fibre pour des échantillons renforcés par fibres, (a) état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (b) état dense ( $D_r = 80\%$ ).....	89
<b>Figure 4.17:</b> Variation de la contrainte de cisaillement maximale ( $\tau_{max}$ ) en fonction de la teneur en fibre $F_c$ (%) des échantillons non renforcés et renforcés du sable de Chlef sous trois contraintes normales ( $\sigma_n = 50, 100$ et $200$ kPa) à un état de densité relative moyen ( $D_r = 50\%$ ) et dense ( $D_r = 80\%$ ) pour trois types de fibres différentes, (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.....	90

## Liste des tableaux

### Chapitre 3

**Tableau 3.1:** Caractéristiques physiques du sable naturel de Chlef .....62

**Tableau 3.2:** Propriétés physiques et mécaniques des fibres utilisées.....63

### Chapitre 4

**Tableau 4.1:** Coefficients A, B et  $R^2$  de l'équation.....75

**Tableau 4.2:** Coefficients A, B et  $R^2$  de l'équation.....76

**Tableau 4.3:** Coefficients A, B et  $R^2$  de l'équation.....76

**Tableau 4.4:** Paramètres de résistance au cisaillement (angle de frottement interne et cohésion) d'échantillons renforcés par différents types et teneur en fibre à l'état moyennement dense et dense.....76

**Tableau 4.5:** Valeurs du rapport de résistance au cisaillement ( $S_r$ ) pour des échantillons de sable renforcé par différents types et teneur en fibre à l'état moyennement dense et dense.....83

## Liste des symboles

$\sigma_{\text{cap}}$ : Tension de surface  
 $r_{\text{cap}}$ : Rayon capillaire  
 $\theta_{\text{cap}}$ : Angle de contact liquide/fluide  
 $\gamma$ : Poids volumique du fluide  
 $p$ : Poids du sol sec  
 $w_L$ : Limite de liquidité  
 $I_P$ : Indice de plasticité  
 $M_h$ : Masse du sol humide  
 $M_s$ : Masse du sol sec  
 $M_w$ : Masse de l'eau  
 $C_c$ : Indice de compression du sol  
 $C_s$ : Indice de gonflement du sol  
 $\sigma_p$ : Contrainte de pré consolidation  
 $E_{\text{œd}}$ : Module œdométrique  
 $c_v$ : Coefficient de consolidation  
 $k$ : Coefficient de perméabilité  
 $e$ : Indice des vides  
 $\sigma_{vo}$ : Contrainte due au poids des terres  
 $E$ : Module d'Young  
 $\nu$ : Coefficient de poisson  
 $f_T$ : Facteur de correction due à la température  
 $F_c$ : Fraction ou teneur en fines  
 $e_i$ : Indice des vides initial  
 $e_{\text{max}}$ : Indice des vides maximal  
 $e_{\text{min}}$ : Indice des vides minimal  
 $p$ : Pression due à la charge  $C$   
 $P_s$ : Poids du sol sec  
 $V_s$ : Volume des grains solides  
 $N$ : Effort normal appliquée  
 $T$ : Effort tangentiel appliqué  
 $v$ : Vitesse de cisaillement  
 $w_{\text{opt}}$ : Teneur en eau optimale  
 $w_{\text{nat}}$ : Teneur en eau naturelle

**C<sub>u</sub>**: Coefficient d'uniformité  
**C<sub>C</sub>**: Coefficient de courbure  
**γ<sub>d</sub>**: Poids volumique sec  
**γ<sub>dmax</sub>**: Poids volumique sec maximal  
**γ<sub>dmin</sub>**: Poids volumique sec minimal  
**γ<sub>h</sub>**: Poids volumique humide  
**γ<sub>s</sub>**: Poids volumique des grains solides  
**γ<sub>w</sub>**: Poids volumique de l'eau  
**φ**: Angle de frottement interne  
**C**: Cohésion  
**τ**: Contrainte de cisaillement  
**τ<sub>max</sub>**: Contrainte de cisaillement maximale  
**τ<sub>rupt</sub>**: Contrainte tangentielle à la rupture  
**σ<sub>rupt</sub>**: Contrainte normale à la rupture  
**σ<sub>n</sub>**: Contrainte normale  
**D<sub>r</sub>**: Densité relative  
**ΔH**: Déplacement horizontal  
**H**: Hauteur ou épaisseur de l'échantillon  
**D<sub>10</sub>**: Diamètre efficace  
**D<sub>30</sub>**: Diamètre correspondant à 30% du tamisât cumulé  
**D<sub>50</sub>**: Diamètre moyen  
**D<sub>60</sub>**: Diamètre correspondant à 60% du tamisât cumulé  
**D**: Diamètre des grains  
**A<sub>c</sub>**: Aire corrigée de l'échantillon

## *Introduction générale*

## **Introduction générale**

Le secteur d'urbanisme et de génie civil a connu ces dernières années une progression accélérée à tel point que certaines prévisions annoncent la saturation des sites à bon sol favorables à la construction. La réalisation des ouvrages d'infrastructures nécessite l'utilisation des surfaces des sols disponibles qui sont parfois faibles ou de portance limitée. L'instabilité des sols granulaires constitue une problématique majeure en géotechnique car celle-ci est susceptible d'être à l'origine de catastrophes très graves. La région de Chlef a enregistré, à titre d'exemple, lors du séisme du 10 Octobre 1980, des ruptures du sol par liquéfaction dont a résulté des affaissements et des glissements. L'étude de ce risque a suscité l'intérêt d'un grand nombre de chercheurs de par le monde qui ont cherché à mettre en lumière les conditions dans lesquelles celui-ci se produit. Des recherches avancées ont révélé que la présence de l'eau concourt significativement au potentiel à la liquéfaction des sols granulaires fins. Le fort excès de la pression d'eau des pores se traduit par de faibles contraintes effectives, ce qui réduit la résistance au cisaillement du sol, et la rend plus faible en augmentant le risque d'instabilité par la liquéfaction. N'échappant pas à ce contexte, la thématique que nous souhaitons étudier rentre dans la problématique des risques naturels, d'une part du fait de l'existence des sols qui y sont naturellement sensibles, et d'autre part et surtout les solutions proposées pour minimiser l'effet de ce risque à travers l'amélioration de ces sols par le renforcement. Le travail de recherche proposé est consacré donc à l'étude en laboratoire de l'influence de l'ajout du renforcement par fibres naturelles et synthétiques distribuées aléatoirement, sur les caractéristiques mécaniques du sol en prenant en considération le comportement du composite sol-renforcement sous l'effet d'un certain nombre de paramètres.

Le présent travail comporte quatre chapitres:

Le premier chapitre présente les différentes méthodes de renforcement, traitement et d'amélioration des sols;

Le deuxième chapitre décrit, d'une part, le renforcement des sols par fibre et les recherches entreprises dans ce cadre et d'autre part passe en revue les paramètres influant sur le comportement du composite sol-fibre. Ce chapitre est aussi consacré à l'incidence du renforcement par fibre sur les sols à risque;

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des caractéristiques physiques des matériaux utilisés constitués du sable d'oued Chlef ainsi que les différents types de fibres de renforcement. En plus des dispositifs expérimentaux utilisés dans cette étude, ainsi que la description des procédures expérimentales et des protocoles des essais réalisés;

Dans le quatrième chapitre, on présente les résultats des essais à la boîte de cisaillement direct. On montre en détail les résultats des essais réalisés sur les échantillons du sol non renforcés et renforcés par fibres distribuées aléatoirement ainsi que l'influence de la teneur et du type de fibre et d'un certain nombre de paramètres comme: le contrainte normale et la densité relative sur le comportement mécanique du sol renforcé.

Le travail sera couronné par une conclusion générale, des perspectives de recherches futures à la lumière des résultats trouvés et une liste des références citées dans le texte.

*Chapitre 1:*  
*Différentes méthodes de renforcement, traitement et*  
*d'amélioration des sols*

## **1.1. Introduction**

La nécessité d'utiliser des terrains de plus en plus médiocres pour les constructions de génie civil n'a fait que croître au cours des dernières décennies. D'une part le développement imposé de réaliser dans les zones de terrains en place non encore construite, qui sont souvent les plus médiocres, des fondations, des grandes excavations, des tunnels.

D'autre part le sol, matériaux peu coûteux, est devenu de plus en plus un matériau de construction et l'on cherche, pour des raisons souvent économiques, à pouvoir utiliser les sols de qualité médiocre.

Il en a résulté le développement d'un très grand nombre de techniques destiné à augmenter les caractéristiques mécaniques globales des sols en place ou rapportés. On peut distinguer trois grandes catégories de techniques:

- Les techniques d'amélioration: Compactage par explosifs, compactage dynamique, vibrocompactage, drainage et électro-osmose;
- Les techniques de traitement: Déshydratation, congélation et les additions des ajouts minéraux;
- Les techniques de renforcement: Les géosynthétiques et les inclusions rigides verticales.

L'amélioration, traitement et le renforcement des sols ont été de plus en plus utilisés pour des ouvrages définitifs, dans des zones sismiques et pour la réparation des ouvrages anciens (reprise en sous-oeuvre, confortations, etc.) il est à noter également que les mécanismes de comportement et la connaissance de l'amélioration apportée ont nécessité de nombreuses expérimentations en vraie grandeur, lesquelles ont constitué un élément essentiel de la recherche.

## **1.2. Domaine et limites d'application des différentes techniques**

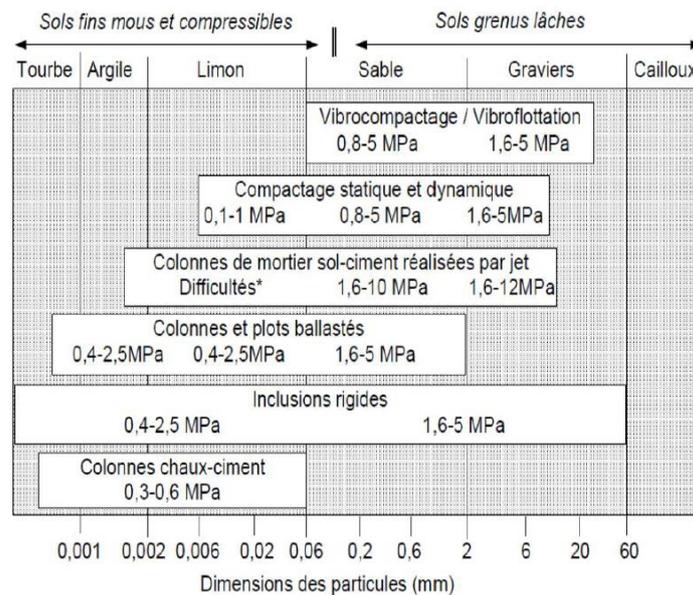
La démarche d'application d'une technique d'amélioration des sols comporte quatre étapes (Dhouib, 2003):

- Définition des critères du projet: Emprise, sollicitations, tassements tolérés;
- Identification des sols: Nature, granulométrie, présence d'eau;
- Choix de la solution d'amélioration des sols;
- Optimisation de la solution d'amélioration des sols la mieux adaptée.

L'application des techniques d'amélioration des sols est directement liée à la granulométrie des sols à traiter.

La figure 1.1 présente une description des domaines d'utilisation des différentes méthodes d'amélioration des sols par création d'inclusions, qui combine les classes granulométriques et l'état du sol, représenté par sa résistance de cône  $q_c$  au pénétromètre statique.

L'amélioration des sols a en effet un domaine d'action optimale pour chaque technique, qui dépend de la nature des sols mais aussi de leur état de compacité et de sur consolidation. Des gammes de résistance différentes sont spécifiées pour les sols fins, d'une part, et pour les sols grenus, d'autre part. La classification d'après les essais au pénétromètre statique peut être remplacée par une classification au scissomètre de chantier pour les sols fins, au pénétromètre à carottier (SPT) pour les sables lâches, en particulier, et à la pression mètre, en général.



\* Utilisation de grande énergie ou de double jet.

**Figure 1.1:** Limites et domaine de validité des techniques d'amélioration des sols.

### 1.3. Les méthodes d'amélioration des sols

#### 1.3.1. Compactage par explosifs

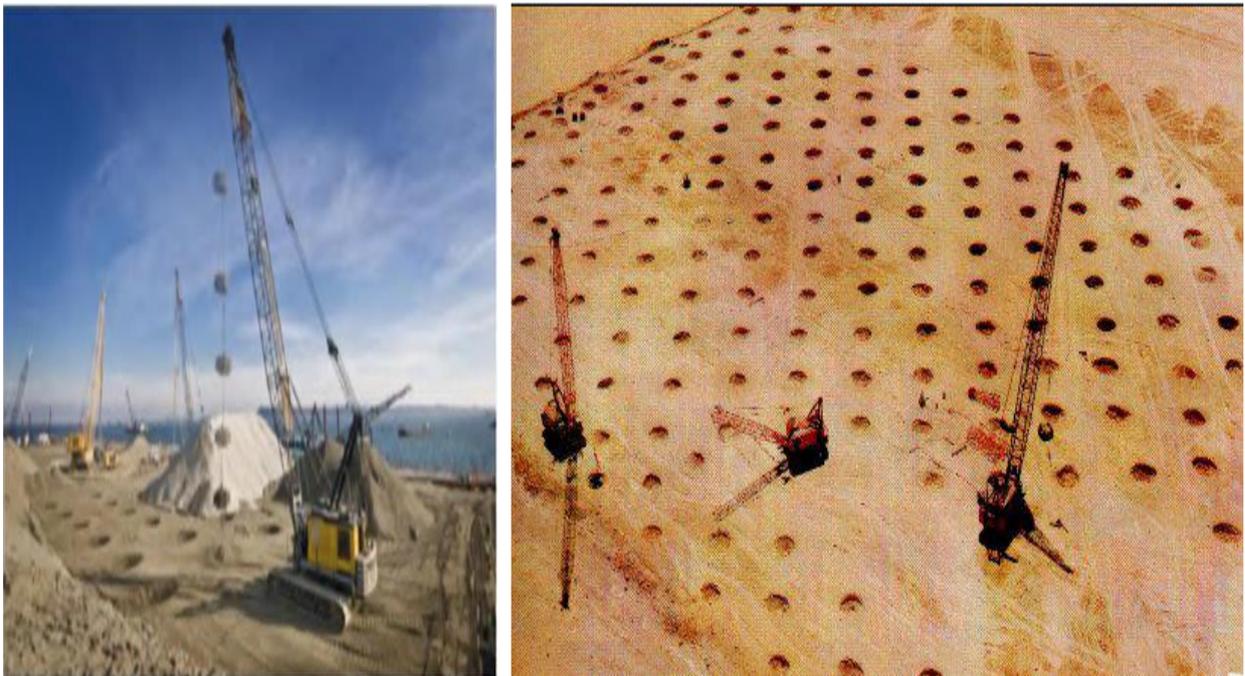
Utilisé généralement loin des zones urbaines, Il permet un compactage rapide et non coûteux de grands volumes de sol atteignant des profondeurs importantes. L'explosion induit une onde de choc qui se tend en comprimant le sol; ainsi produite, l'onde de choc génère dans le sol des contraintes de cisaillement alternées. En dépassant la résistance frottement entre grains, elles engendrent des déplacements relatifs entre ces grains. Ces mouvements des grains induisent une diminution du volume des vides, si le sol est saturé cette diminution génère une augmentation de la pression

interstitielle qui nous conduira à la liquéfaction. Dans le cas d'un sable, la dissipation de la surpression est très rapide, le sol obtient un nouveau réarrangement plus dense. (DEMBICKI E, KISIELOWA (1983)).

### 1.3.2. Compactage dynamique

Le principe de cette méthode consiste à faire tomber en chute libre une masse de 10 à 30 tonnes d'une hauteur de 15 à 20 mètres. La masse ainsi lancée produit un impact de forte énergie au contact du sol; ce dernier va se compacter sous l'influence des contraintes de cisaillement provoquées par le choc qui induit des mouvements relatifs entre les grains du sol.

Dans le cas d'un sol pulvérulent, la densification mène à la liquéfaction de la zone perturbée et un nouveau réarrangement est obtenu après dissipation de la surpression interstitielle toujours sous l'influence de la gravité. La figure 1.2a montre un atelier de compactage dynamique en action et la figure 1.2b des impacts de compactage dynamique à la surface du terrain, avant qu'ils soient rebouchés. (DEMBICKI E, KISIELOWA (1983)).

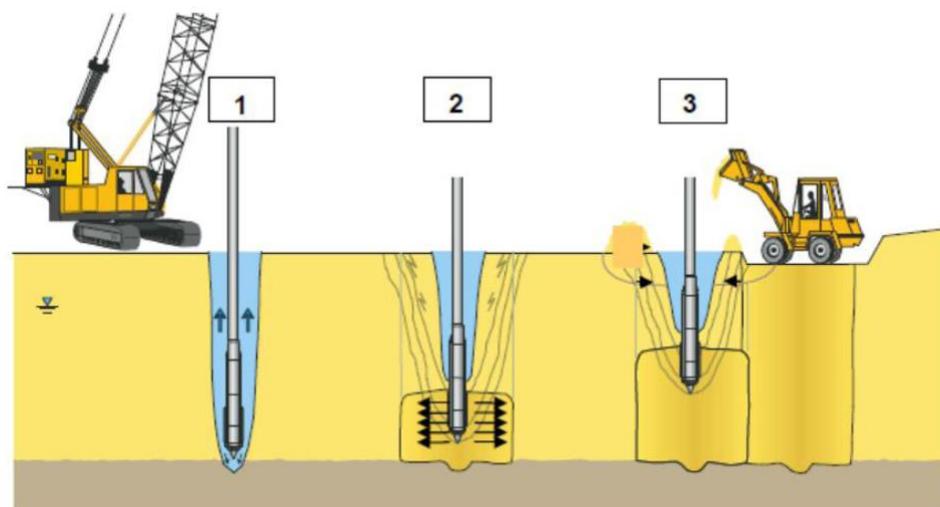


**Figure 1.2:** Atelier de compactage dynamique et impacts de la masse (Document Keller).

### 1.3.3. Vibrocompactage

Ce procédé est utilisé pour les sites à proximité des habitations. Le principe consiste à enfoncer un tube dans le sol à l'aide d'un jet d'eau sous pression. Le jet d'eau est placé à l'extrémité inférieure du tube, il facilite la pénétration de ce dernier dans le sol en affaiblissant les propriétés du sol attaqué. Lors de sa remontée, celui-ci est mis en vibration. Elles génèrent des contraintes de

cisaillement alternées qui vont provoquer par la suite induire des mouvements relatifs des grains réduisant l'indice des vides et provoquant un nouvel arrangement plus dense si le sol est saturé, la réduction du volume des vides produit une liquéfaction totale du sol autour du tube et de la zone perturbée, après dissipation de la surpression interstitielle, un tassement et un nouveau réarrangement des grains est obtenu sous l'influence de la gravité (Figure 1.3). (DEMBICKI E, KISIELOWA (1983)).



(1) Fonçage du vibreur (2) Compactage des sols (3) Apport des matériaux et finition

**Figure 1.3:** Etapes du vibrocompactage des sables et graviers (Document Keller).

#### 1.3.4. Amélioration des conditions de drainage

Le drainage vertical est une technique complémentaire des techniques de préchargement. Il permet une consolidation plus rapide du sol. Ce procédé est inefficace dans les sols tels que les argiles très organiques et les tourbes où leur comportement de tassement est beaucoup plus dominé par la compression secondaire. Les drains verticaux permettent donc au drainage de s'effectuer horizontalement et verticalement (Figure 1.4). (BOUTOUIL, M., LEVACHER, D. (2000)).

#### Les inconvénients:

- La perméabilité du sol est difficile à estimer avec une précision meilleure qu'un ou deux ordres de grandeur.
- Ce qui a des conséquences énormes sur le choix de la maille de drainage.
- Le problème étant accru du fait de la variabilité naturelle des terrains liquéfiables (teneurs en fines variables notamment).
- En outre il ne faut pas négliger le risque de colmatage des drains dans le temps ou au moment de la mise en oeuvre (cas des colonnes ballastées notamment).

- Il est alors difficile de garantir que la quantité d'eau nécessaire puisse être évacuée au cours des quelques secondes ou dizaines de secondes critiques d'un tremblement.

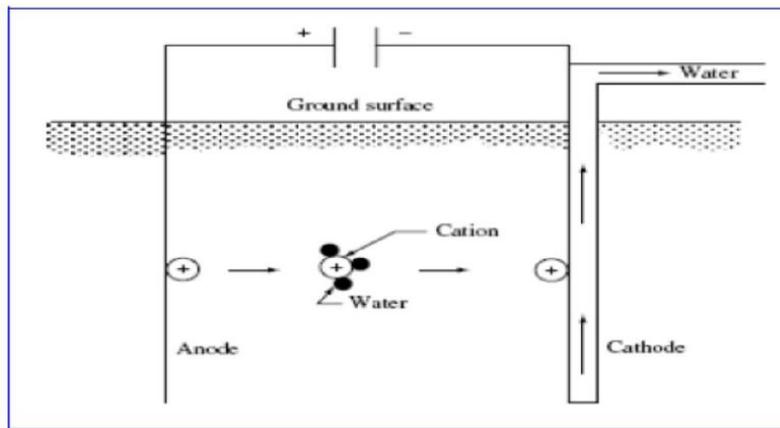


**Figure 1.4:** Installation des drains.

### 1.3.5. Electro-osmose

L'électro-osmose a été initialement mise au point par Casagrande (1947) pour éliminer l'eau contenue dans les argiles actives à faible perméabilité. Cette technique s'est révélée efficace lorsqu'elle a été employée pour introduire un agent chimique dans le sol, soit par dissolution de l'anode, soit par utilisation directe d'un électrolyte. Cette opération améliore la stabilité du sol soit par modification chimique dans les matériaux argileux par déplacement d'ions, soit par cimentation partielle des vides interstitiels. Cette variante d'électro-osmose est connue sous le nom de stabilisation électrochimique (Figure 1.5).

Le phénomène d'électro-osmose sert à appliquer une différence de potentiel dans un matériau poreux saturé, l'électrolyte se déplace de l'anode vers la cathode. (Walid Zoubir(2009)).



**Figure 1.5:** Eléctro-osmose.

## 1.4. Méthodes de traitement des sols

### 1.4.1. Déshydratation

La déshydratation par la chaleur est très rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple. En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage. (Jean-Pierre Magnan et Georges Pilot(2014)).

### 1.4.2. Congélation

Pour les sols fins: La méthode de renforcement temporaire des sols par congélation, développée principalement pour les matériaux grenus (sables, graviers), peut être appliquée aux argiles molles et aux limons, lorsque aucune autre solution n'est possible. L'effet de la congélation dépend de la température (il augmente quand la température diminue). Par ailleurs, il faut réaliser la congélation le plus rapidement possible pour limiter le gonflement du sol et il faut tenir compte de la déstabilisation du massif de sol au dégel (Figure 1.6).

Les techniques de refroidissement utilisées reposent, comme pour les sables et les graviers, sur la circulation d'un fluide froid (Azote liquide, habituellement) dans des tubes enfoncés dans le massif de sol.

Pour les sols grenus: La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

La congélation est réalisée par circulation de saumure ou d'un gaz réfrigérant (Azote liquide, habituellement) dans des tubes mis en place dans le sol à traiter. L'utilisation d'azote liquide permet une progression rapide du front de gel et une plus grande souplesse dans le maintien de la zone gelée.

L'augmentation de volume de l'eau lors de sa transformation en glace peut provoquer des désordres dans le voisinage de la zone traitée et doit être prise en compte lors de l'élaboration du projet de traitement. (Jean-Pierre Magnan et Georges Pilot(2014)).



**Figure 1.6:** Traitement par congélation sous bâtiment pour tunnel de métro.

### **1.4.3. Traitement des sols par addition d'ajouts minéraux**

Traiter un sol consiste à mélanger intimement ses éléments à une certaine quantité d'addition. Cette opération provoque une modification physico-chimique qui intervient dans la stabilisation du sol tel que réactions d'échange de base avec les particules d'argile (Cation) et les réactions pouzzolaniques (Cimentation), qui corrige ses défauts de perméabilité et améliore ses qualités de résistance (Capacité portante) et de durabilité. Le traitement des sols en place ou rapportés est aujourd'hui très largement employé surtout le territoire. Il est par ailleurs d'une grande simplicité de mise en oeuvre. Les ajouts minéraux les plus utilisés:

#### **1.4.3.1. Ciment**

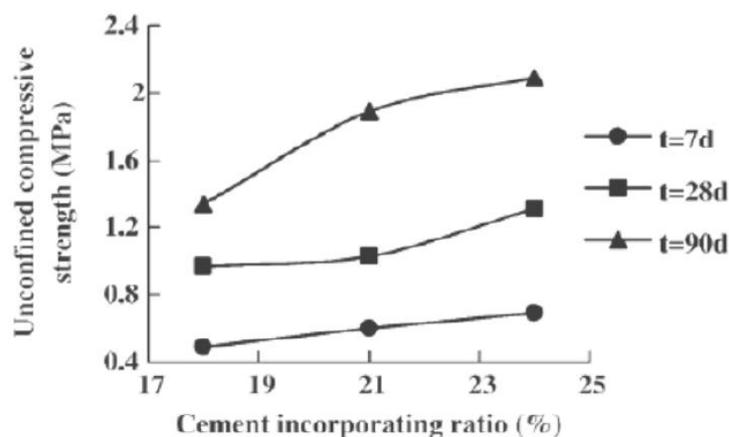
Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont à priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, auxquels il apporte cohésion, résistance mécanique et stabilité à l'eau et au gel. Les doses varient de 3.5 à 5% du poids de sol sec à traiter. (Bulletin Cfr-info, 2002) (Figure 1.7).

L'action de stabilisation par les ciments, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température. De plus, la présence de la chaux dans les ciments provoque des réactions d'échange. Les pourcentages utilisés varient de 2 à 6%. Le ciment est parmi les liants les plus fréquemment utilisés dans le traitement des sols de surface (Thomas et al. 2002).

D'après Haofeng et al (2009), la résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours, augmente au fur et à mesure que l'augmentation du pourcentage en ciment (Figure 1.8).



**Figure 1.7:** Chantier de traitement du sol au ciment.



**Figure 1.8:** Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage en ciment à différentes durées de cure (Haofeng et al. 2009).

### 1.4.3.2. Chaux

La stabilisation par ajout de la chaux est la technique de traitement des sols la plus répandue, elle concerne essentiellement les sols fins (argileux, limoneux et marneux), L'utilisation de cette technique permet:

- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols médiocres.
- De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé.
- De modifier les propriétés du sol.

Sachant qu'il y a deux types de chaux, vive et éteinte, le choix s'effectue en se basant sur les essais de laboratoire, les essais de chantier et sur le prix de revient (Figure 1.9).



**Figure 1.9:** Chantier de traitement d'un sol à la chaux (France, 2009).

### 1.4.3.3. Cendres volantes

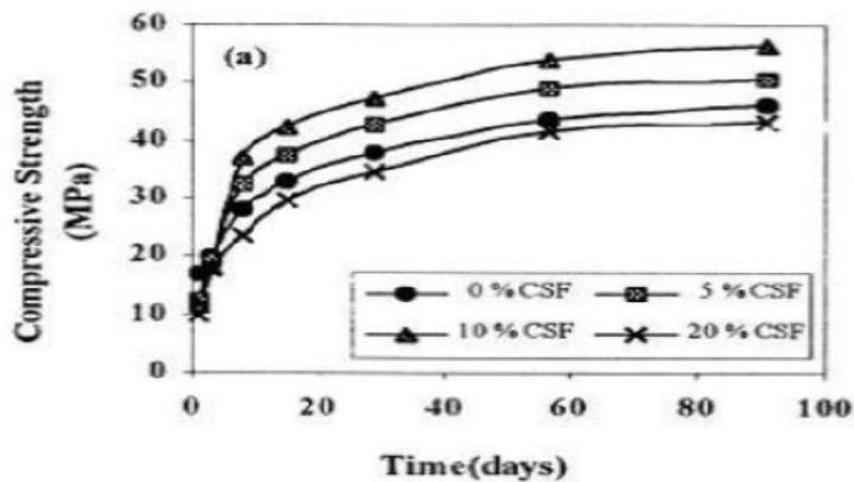
Les cendres volantes sont un sous-produit des centrales thermiques qui brûlent le charbon en poudre. Elles sont considérées comme une pouzzolane artificielle et s'emploient comme telle, avec du ciment pour faire du béton ou dans le sol-ciment. Les cendres volantes ont été employées aussi avec de la chaux dans la stabilisation des sols (Matea, 1964).

Zalihe Nalbantoglu, (2002) a étudié la stabilisation des argiles gonflantes par les cendres volantes. Les résultats d'essai en laboratoire sur ces sols indiquent que ces cendres volantes sont efficaces à l'amélioration de la texture et la plasticité des sols traités. Elles permettent de réduire l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement.

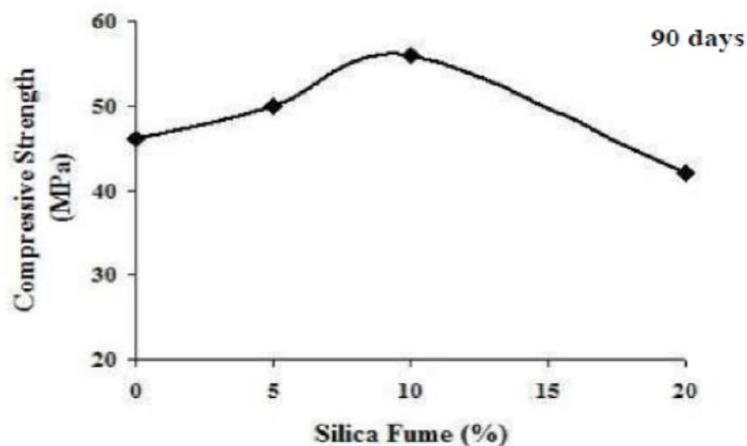
#### 1.4.3.4. Fumées de silice

Les fumées de silice sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre de l'ordre de  $0.1\mu\text{m}$ . Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent comporter au moins 85% (en masse) de silice amorphe et avoir une surface massique supérieure à  $15\text{m}^2/\text{g}$ .

Les fumées de silice ont des propriétés pouzzolaniques avérées, (Kumar-Mehta et Malhotra, 1996). Asavapisit et al (2001) présentent l'évolution de résistances à la compression simple  $R_c$  avec l'âge (Figure 1.10) de boues de clapage. La meilleure valeur de  $R_c$  est obtenue avec 10% de fumées de silice, mais au-delà et pour 20% de fumées de silice ajoutée,  $R_c$  diminue (Figure 1.11). Ainsi il existerait une valeur optimale. Il est possible que les fumées de silice en excès occupent les pores et réduise la place disponible pour les produits d'hydratation et ainsi limite l'étendue hydraulique.



**Figure 1.10:** Evolution des  $R_c$  de boues de clapage: Mélange de ciment et de Fumées de silice (CSF), d'après (Asavapisit et al. 2001).



**Figure 1.11:** Evolution de  $R_c$  de boues de clapage selon différents dosages en fumées de silice: 0, 5, 10 et 20% (Asavapisit et al, 2001).

## 1.5. Méthodes de renforcement des sols

### 1.5.1. Géosynthétiques

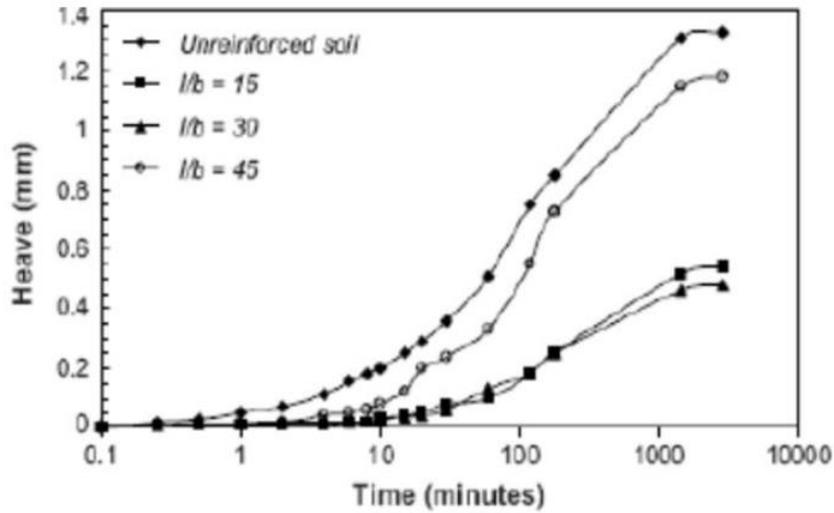
Un géo synthétique est défini, selon la société internationale de géosynthétique (IGS, 1998), comme un matériau polymérique (synthétique ou naturel) utilisé en contact avec le sol/roche et/ou autre matériau géotechnique dans les applications de l'ingénierie. (w.delleur, Jacques. (1998))

Selon la même société, ces matériaux peuvent assurer les fonctions suivantes: Soutènement, drainage, filtration, séparation, protection et renforcement (résister aux contraintes et déformations dans les structures géotechniques). Les différents types de matériaux géosynthétiques sont:

- Produits polymériques (polypropylène, polyester, polyéthylène, polyamide, polyvinylechloride, polystyrène).
- Géotextiles.
- Geogrides.
- Geonets.
- Geomembranes.
- Geocomposites.

Dans la fonction de renforcement, le rôle des géosynthétiques est d'ajouter les propriétés de résistance à la traction au sol (qui est un matériau avec de bonnes caractéristiques en compression) pour produire un matériau qui a à la fois les caractéristiques de résistance à la traction et à la compression. Le renforcement est le résultat du transfert des contraintes de traction du sol vers le géosynthétique à l'aide du frottement développé entre les deux.

- Vessely et al (2002), ont montré que les inclusions de géosynthétiques sont efficaces sur la réduction du potentiel de gonflement des sols expansifs.
- Ikizler et al (2008), ont reporté que la réduction du potentiel et la pression de gonflement est le résultat de l'inclusion de polystyrène placé entre un sol expansive et un mur rigide.
- Tang et al (2007), montrent que le renforcement par les fibres augmente la résistance à la compression et permet de réduire le potentiel de gonflement des argiles expansives.
- Cai et al (2006), reportent que l'augmentation de contenu en fibre implique une réduction dans le potentiel de gonflement des argiles stabilisées à la chaux.
- Viswanadham et al (2006), ont montré que les mélanges renforcés par les fibres engendrent une grande réduction du gonflement avec des faibles pourcentages (0.25%) et des petites fractions de 15 et 30 (Figure 1.12).



**Figure 1.12:** Variation du gonflement en fonction du temps ( $f = 0.25\%$ ). (Viswanadham et al. 2006).

f: Continue de fibre dans le sol.

l: Largeur de fibre.

b: Longueur de fibre différence de potentiel.

### 1.5.1.1. Fibres de polypropylène

#### a. Définition

Le polypropylène est un matériau polymère hydrocarboné synthétique, il est l'un d'un groupe de fibres synthétiques, de polymères (Y compris, mais sans s'y limiter, le nylon, le polyester et le polyéthylène) adapté de l'industrie textile, qui ont été ajoutés au PCC dans une tentative d'améliorer performance. Actuellement polypropylène est le plus largement utilisé de la synthèse des fibres pour les applications de pavage (Zollo, 1985). Il y a plusieurs types de polypropylène comme montre la figure 1.13.



fibrillated



staple fiber



Monofilament



staple fiber with crimp

**Figure 1.13:** Les types de polypropylène.

La grande majorité des géotextiles sont fabriqués à partir de polypropylène ou de polyester polymères formés sous forme de fibres ou de fils et enfin dans un tissu tissé ou non-tissé. Les feuilles sont flexibles et perméable et généralement ont l'apparence d'un tissu. Il y a au moins 80 domaines d'application spécifiques pour les géotextiles qui ont été développés; Cependant, le tissu effectue toujours au moins un des cinq fonctions distinctes:

- Séparation.
- Renforcer.
- Filtration.
- Drainage.
- Contrôle de l'érosion.

#### **b. Caractéristiques générales**

- Bonne stabilité thermique.
- Faible densité.
- Résistance haute température.
- Ecologique.
- Rigides bonne résistance à l'impact.
- Bonne résistance à la fissure sous tension.
- Solide et durable.
- Imperméable.

### **c. Structure moléculaire et la chaîne**

Polypropylène est une synthèse, moléculaire plus linéaire de masse élevée de propène. En 1955 Natta et al. Suffisamment grandes quantités préparées de PP pour isoler et caractériser divers stéréo-isomères, ce qui a conduit à une nouvelle nomenclature descriptive encore Utilisé aujourd'hui. Intérêt commercial réside principalement dans le polypropylène hautement cristallin. Avec ses autres modifications par copolymérisation.

En polypropylène parfaitement isostatique, chaque unité monomère dans la chaîne est disposée dans un ensemble régulier Bandeaux-bêche, sans aucune ramification ou de 1, 3 ajouts. Ceci est le résultat de type matrice de contraintes par le catalyseur stéréospécifique hétérogène. Dans la pratique, une telle perfection est difficile à achever une erreur occasionnelle, une moyenne d'environ 0.3-1.5 par centaine de maillons de la chaîne se produit dans certains, mais pas également dans toutes les chaînes. La nature multi site du catalyseur solide est considérée comme responsable de ce comportement.

Solvay et  $MgCl_2$  pris en charge les systèmes réduisent l'ampleur de ces erreurs, et avec eux la quantité de non cristalline (a tactique) polymère. Encore au stade de développement, les catalyseurs à site unique à base de métallosène (SSCS) produisent également des erreurs de stéréorégularité, mais ceux-ci semblent être répartis de manière plus uniforme le long des chaînes, quel que soit leur longueur. Ce qui contraste avec les catalyseurs multi site (MSC) pour lesquels mauvais placement varient en fréquence et en nombre. La tendance est ici pour la fraction de masse moléculaire élevée pour contenir moins de défauts, tandis que les chaînes courtes souffrent de perturbations excessives, qui conduisent à cristallinité réduite.

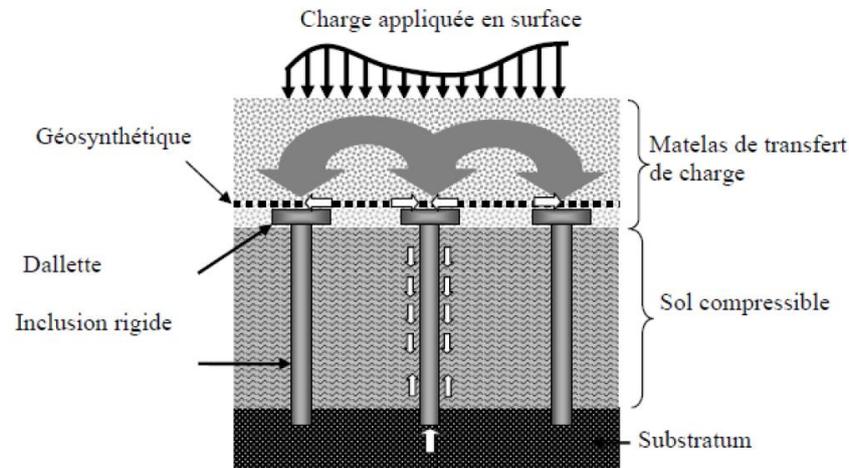
#### **1.5.2. Inclusions rigides verticales**

##### **1.5.2.1. Principe de la méthode**

Le principe du renforcement est illustré par la figure 1.14. La charge appliquée en surface est transmise à un substratum rigide par l'intermédiaire de la combinaison d'un réseau d'inclusions rigides et d'un matelas de transfert de charge.

Le matelas de transfert de charge est disposé entre le sol compressible renforcé par les inclusions et l'ouvrage en surface. Sa fonction est de réduire et d'homogénéiser les tassements sous l'ouvrage en assurant le transfert des charges vers les têtes d'inclusion. Le matelas de transfert de charge est constitué de sol granulaire. Le tassement différentiel en base du matelas entre les inclusions rigides et le sol compressible induit du cisaillement dans le sol granulaire et donc la formation de voûtes

qui assurent le transfert des charges vers les têtes d'inclusion, l'homogénéisation et la réduction des tassements en surface. La présence de ce matelas différencie cette technique de celle des pieux, car les inclusions sont désolidarisées de l'ouvrage en surface.



**Figure 1.14:** Principe de la méthode.

### 1.5.2.2. Différents types des inclusions

De nombreux types d'inclusions rigides peuvent être envisagés suivant les propriétés mécaniques et la géométrie de la couche compressible. Les inclusions peuvent être préfabriquées ou construites in situ. Leur module de déformation varie entre 20 MPa (Colonne de soil mixing) et 200 GPa (pieu métallique).

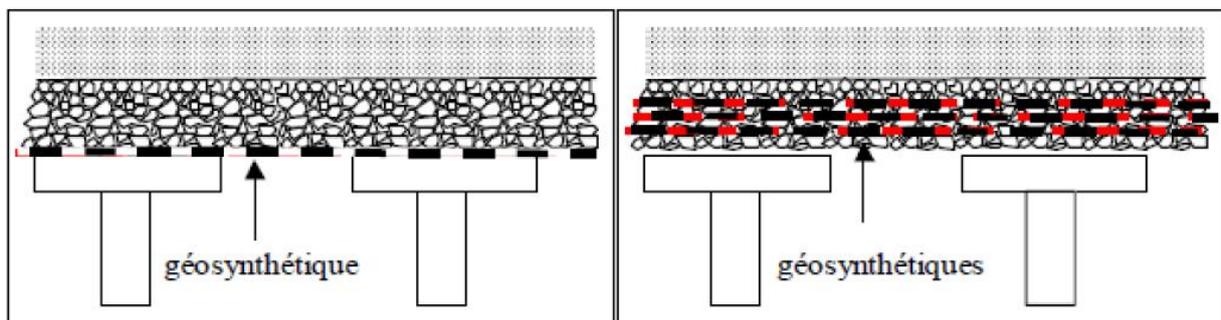
Parmi les inclusions préfabriquées se retrouvent tous les types de pieux mis en place par battage ou fonçage (pieux bois, pieux métalliques, pieux en béton armé ou précontraint). L'avantage des pieux préfabriqués est qu'ils sont constitués d'un matériau manufacturé. Par contre leur mise en place peut être source de nuisances sonores ou vibratoires et dans certains cas le refoulement latéral du sol peut affecter les structures voisines.

Parmi les inclusions construites in situ on distingue essentiellement les pieux forés, les pieux battus tubés (pieux en béton armé), les pieux de type «Vibro Concrete Column » (VCC), les colonnes à module contrôlé (CMC, Liausu et Pezot, 2001), les colonnes par mélange d'un liant avec le sol (jet grouting, Lime Cement Columns, etc.).

### 1.5.2.3. Nappes de renforcement

Le renforcement en base du matelas de transfert de charge par des nappes horizontales est peu courant en France mais assez répandu dans de nombreux autres pays (Briançon et al. 2004). Les

seules normes ou recommandations existantes dans le domaine préconisent son utilisation (BS8006, 1995; EGBEO, 2004). Lorsque qu'une seule nappe géosynthétique est disposée sur les têtes d'inclusion, elle contribue au renforcement par effet membrane. Lorsque plusieurs nappes sont mises en oeuvre au sein du matelas granulaire, à l'effet membrane se rajoute un effet de rigidification du matelas (Guido et al. 1987; Bell et al. 1994; Collin, 2004). La figure 1.15 présente les différentes dispositions de la nappe dans le matelas. Les nappes de renforcement sont généralement constituées soit de géotextiles, soit de géo grilles qui permettent l'enchevêtrement du sol dans la nappe. Dans certains cas, le matelas est également renforcé par un treillis soudé (Combarieu et al. 1994).



**Figure 1.15:** Différentes dispositions du renforcement horizontal dans le matelas de transfert de charge, d'après (Briançon et al. 2004).

## 1.6. Conclusion

Les différentes techniques pour l'amélioration des sols sont largement utilisées à travers le monde afin de prévenir les risques sismiques ou pour consolider des terrains à la structure hétérogène, inconstructibles en l'état. L'utilisation intensive de remblais sableux pour gagner des terrains sur la mer en est sans doute l'exemple le plus représentatif. Dans ce but, différentes techniques ont été développées et sans cesse améliorées depuis deux décennies. Grâce à une large gamme de solutions disponibles pour le traitement des sols, qui sont sans cesse maintenues à la pointe de la technologie, en mesure d'apporter une solution globale de traitement pour chaque cas. Les nombreuses références acquises mettent en avant la pérennité et l'efficacité de ces solutions, s'agissant de délais et de qualité du traitement mis en oeuvre. Ces choix doivent toujours être guidés par le souci constant de ne pas aggraver les désordres d'une autre structure qui présente déjà des insuffisances, ou de ne pas mettre en péril la bonne tenue des ouvrages voisins. Dans le chapitre suivant on va aborder l'effet de quelques ajouts sur l'amélioration du comportement des sols.

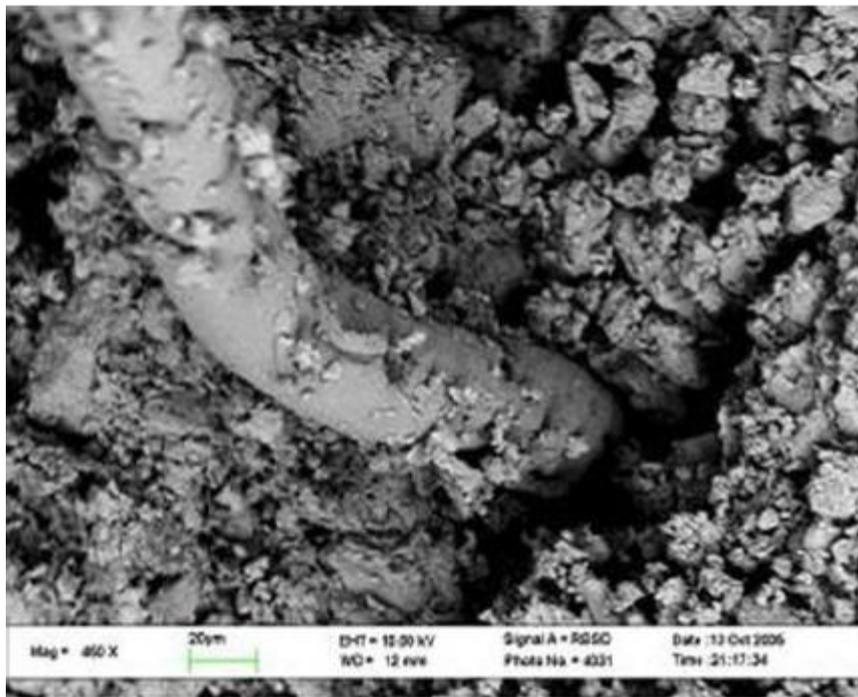
***Chapitre 2:***  
***Renforcement par des fibres et paramètres influents***

## **2.1. Introduction**

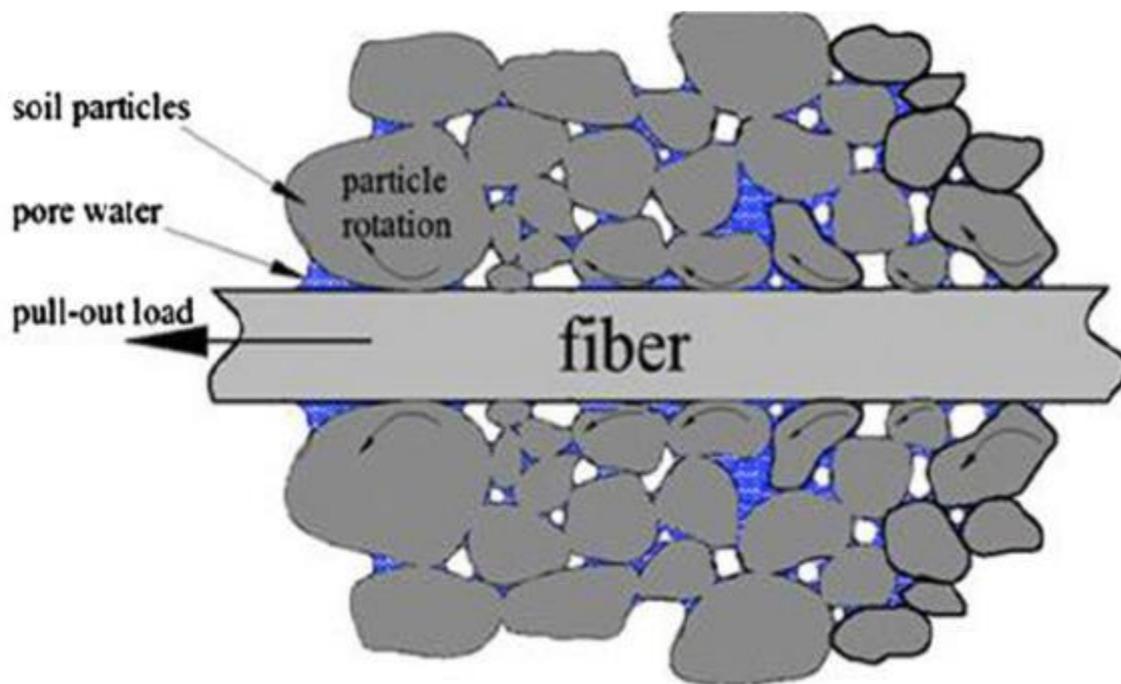
Pour parer aux problèmes posés par l'instabilité des sols, notamment au phénomène de liquéfaction, différentes techniques d'amélioration des sols instables sont proposées, au sein desquelles l'ajout de fibres occupe une place de choix. L'intérêt aux fibres de renforcement pour améliorer les propriétés mécaniques des sols augmente dans de nombreux domaines de la pratique de l'ingénierie géotechnique. Ceci est dû à leur disponibilité, leur faible coût et la diversité de leur influence sur le comportement des sols.

## **2.2. Renforcement des sols par fibres**

L'utilisation de fibres flexibles, discrètes et aléatoires imite le comportement des racines des plantes de la végétation de surface et contribue à la stabilité de la masse du sol en renforçant les sols proches de la surface dans lesquels la contrainte effective est faible (Wu et al. 1988; Greenwood et al. 2004; Greenwood, 2006). Par imitation de la nature, le concept de renforcement par la fibre est également devenu important dans la pratique de la construction technique. En effet, les effets de renforcement, de stabilisation et de renforcement des fibres naturelles sur le sol peuvent être reproduits artificiellement par divers types de fibres naturelles et synthétiques. Le sol renforcé de fibres se comporte donc comme un matériau composite dans lequel des fibres de résistance à la traction relativement élevée sont noyées dans une matrice de sol. Les contraintes de cisaillement dans le sol mobilisent la résistance à la traction dans les fibres, ce qui à son tour confère une plus grande force au sol (Jamshidi et al. 2010; Ghiassian et al. 2008; Abtahi et al. 2008). Les fibres distribuées dans le sol agissent comme un réseau spatial tridimensionnel pour inter verrouillé les grains de sol, aidant les grains à former une matrice cohérente unitaire et limitant le déplacement (Figure 2.1). De nombreuses recherches ont signalé que la rugosité de la surface des fibres affectait fortement la résistance au glissement des fibres (Frost et Han, 1999; Tagnit-Hamou et al. 2005; Tang et al. 2007). Au fur et à mesure que la fibre était mélangée ou que les échantillons étaient compactés, les particules de sable dur heurtaient et abrasaient la surface de la fibre, entraînant une déformation plastique et même l'enlèvement d'une partie de la couche superficielle. Les creux et les rainures qui se sont formés à la surface de la fibre constituaient un interlock et amélioraient les interactions entre la surface de la fibre et la matrice de sable. Ces interactions mécaniques interfaciales entre la fibre et le sable dépendent fortement de la densité sèche du sable et de la teneur en fibres.



(a)



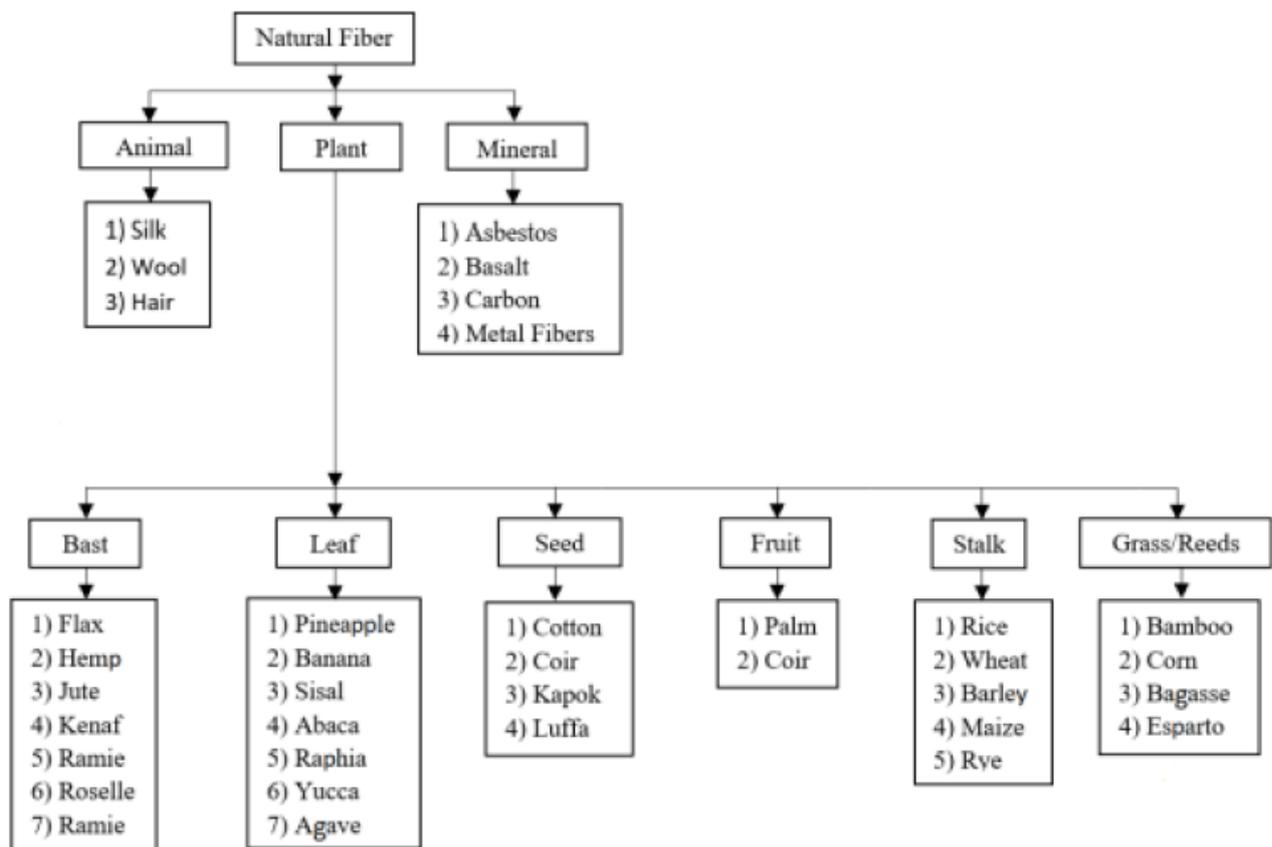
(b)

**Figure 2.1:** (a) Photomicrographie au MEB des particules de sol fixées sur la surface de la fibre après l'essai d'arrachement et (b) dessin d'esquisse des interactions mécaniques interfaciales entre les particules du sol et la fibre (Tang et al. 2010).

## 2.3. Différents types de fibres

### 2.3.1. Fibres naturelles

De nos jours, les fibres naturelles sont largement incorporées dans de nombreuses applications et industries d'ingénierie, y compris les industries automobiles, alimentaires et agricoles en raison de leur abondance, durabilité, rentabilité, faible densité, résistance favorable, rigidité et leur intérêt environnemental (Bordoloi et al., 2017 ; Zakikhani et al., 2014). Sathishkumar et al. 2014 classent les fibres naturelles en trois sections compte tenu de leur origine: la première regroupe les fibres végétales (bambou, jute, coco, chanvre, etc.), la deuxième regroupe celle en provenance des parties animales contenant des protéines (soie, poils, laine, etc.), la dernière regroupe les fibres issues de minéraux. Sur la base de la disponibilité et de l'applicabilité à grande échelle, des intentions géotechniques ont été projetées vers les fibres végétales en termes de fibres naturelles (Figure 2.2).



**Figure 2.2:** Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Sathishkumar, 2014).

Il existe de nombreuses variétés de fibres naturelles. Cependant, seules certaines présentent des propriétés mécaniques remarquables justifiant leur usage comme renfort. Ces propriétés physiques et mécaniques sont associées aux compositions biochimiques des fibres où le composé cellulosique définit la résistance des fibres (Bordoloi et al. 2017). Étant donné que la phase de conception du

renforcement des sols n'a pas été directement associée à des compositions biochimiques, la détermination et l'interprétation des propriétés physiques et mécaniques des fibres sont hautement nécessaires en génie géotechnique. A cet effet, on note plusieurs travaux de recherches existants dans la littérature mentionnant l'efficacité du renforcement du sol par fibres naturelles. Parmi ces travaux, on peut citer (Nilsson, 1975; Kishore et al., 1986; Ghavami et al., 1999; Rowell et al., 2000; Savastano et al., 2000; Ravishankar et al., 2004; Aggarwal et al., 2010; Al Adili et al., 2012). Les résultats de leurs travaux ont pleinement contribué à de bonnes performances physico-mécaniques s'ajustant dans les domaines de l'ingénierie géotechnique.

### **2.3.2. Fibres synthétiques**

Les géosynthétiques sont des produits, dont au moins l'un des constituants est à base de polymère synthétique (polyéthylène, polyamide, polyester ou polypropylène) ou naturel, se présentant sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle. Ces derniers ont connu une utilisation croissante, au cours des 25 dernières années, en raison de la production d'une large gamme de nouveaux matériaux présentant des propriétés mécaniques très différentes de celles disponibles auparavant. La technique de renforcement du sol avec des produits synthétiques est actuellement largement utilisée dans des applications très variées et tend ainsi à remplacer les techniques classiques d'amélioration des sols. Ces produits ont généralement une longue durée de vie et ne subissent pas de dégradation biologique, mais sont susceptibles de créer des problèmes environnementaux à long terme (Kar et al. 2014).

Les fibres synthétiques sont plus utilisées dans le béton et le sol en vue d'améliorer leurs propriétés (Wang, 2006). Elles ont fait leur apparition au début de 20ème siècle, suite au succès de la fibre naturelle. Un grand nombre de fibres synthétiques ont été depuis lors mises au point ; elles se caractérisent chacune par des propriétés spécifiques répondant à un type particulier d'application. Ces fibres sont obtenues, tout comme les fibres naturelles, par filage. Un intérêt certain est porté par les industriels aux fibres synthétiques compte tenu de leur faible coût, de leur disponibilité, de leur autonomie par rapport aux saisons et surtout de la possibilité de les adapter et de modifier leurs propriétés. Il est à souligner qu'elles présentent toutefois certains inconvénients, entre autres leur impact négatif vis-à-vis de l'environnement tout au long du processus de leur utilisation. Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées se présentent ainsi:

- Fibres à base de polymère (polyéthylène, polyamide, polyester ou polypropylène);
- Fibres artificielles: (les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et autres). Elles sont, aujourd'hui, les plus utilisées dans l'industrie de la construction.

## **2.4. Paramètres affectant le comportement des sols renforcés par fibres**

L'efficacité des fibres comme renfort dans les sols dépend de plusieurs paramètres liés à des propriétés des fibres, y compris le type, le contenu, la longueur, le rapport d'aspect, le module d'élasticité, l'orientation et également les caractéristiques du sol, y compris la taille, la forme et la gradation des particules, ainsi que le mode de chargement, le niveau de contrainte et la densité.

### **2.4.1. Effet des propriétés du sol**

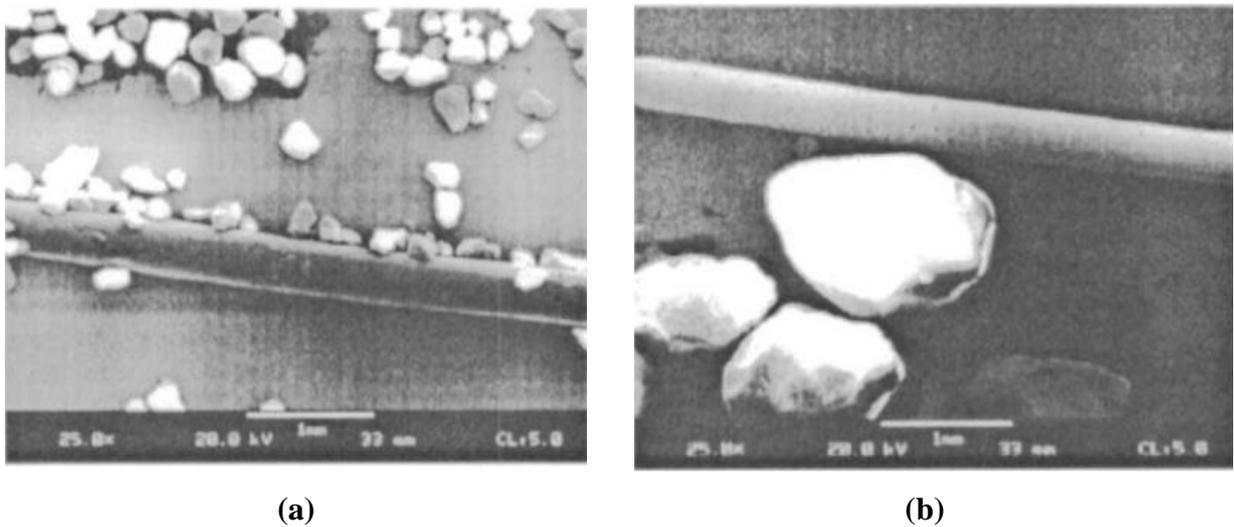
#### **2.4.1.1. Forme des particules**

Des essais triaxiaux réalisés par Al-Refeai (1991) ont montré que le sable fin avec des particules sous-jacentes a une réponse plus favorable au renforcement des fibres que le sable moyen avec des particules su angulaires. Bien que lorsque deux sables ont les mêmes tailles de particules, l'efficacité de contact est plus grande si l'angularité est plus élevée, les résultats semblaient indiquer que le rapport d'angle de frottement n'était pas grandement affecté par le type de sable.

#### **2.4.1.2. Taille des grains**

Il a été noté que, pour la même contrainte de confinement, la résistance du sable renforcé augmente avec la réduction de la taille de grain moyenne  $D_{50}$  (Maher et Gray, 1990; Gray et Al-Refeai, 1986). En outre, une meilleure gradation - augmentation du coefficient d'uniformité,  $C_u$  et un plus petit  $D_{50}$  entraînent une contribution plus importante à la résistance. Michalowski et Cermak (2003) ont entrepris des essais de compression triaxiale drainée sur des échantillons de sable fin et grossier renforcé de fibres de polyamide. Les résultats obtenus ont montré que l'effet de renforcement dans le sable fin est plus prononcé, comparé à celui du sable grossier, lorsque la concentration en fibres est faible (0.5%). Ces résultats sont en accord avec ceux de Al-Rafeai (1991) qui a observé que l'efficacité du contact entre les particules de sables fins et moyens renforcés avec (0.5%) en poids d'inclusions différentes était plus grande dans le cas du sable fin ( $D_{50} = 0 - 18$  mm) que dans celui du sable moyen ( $D_{50} = 0 - 78$  mm). Cependant, l'augmentation relative de la force du sable grossier est plus grande pour les grandes concentrations de fibres (2%). Pour les fibres ayant un allongement de 85, longueur 25.4 mm et concentration  $\rho = 0.5\%$ , l'effet de renforcement dans le sable fin était d'environ 10% supérieur à celui du sable grossier, alors que l'inverse était vrai lorsque la concentration en fibres augmentait à  $\rho = 1.5\%$ . Cet effet est surprenant au début, puisque les essais de traction par fibre ont indiqué une friction d'interface (moyenne) presque identique pour le sable fin et grossier. D'autre part, un essai de traction (ou d'arrachement) à partir de sable stationnaire ne représente pas le processus de glissement dissipatif des fibres et du sable associé à la déformation de la matrice. L'effet décrit ici peut avoir son explication dans la micromécanique de l'interaction

sable-fibre et l'influence des fibres sur la dilatance du sable. Avec une faible concentration en fibres, la dilatation de la matrice entraîne une perte de contact avec les fibres, en particulier lorsque la taille des grains est importante par rapport au diamètre de la fibre (Figure 2.3b). Cela a un effet négatif sur l'interaction grossière sable-fibre, alors que dans le sable fin (Figure 2.3a) elle ne devrait pas nuire à l'interaction sable-fibre. Cependant, une fois que la concentration en fibres augmente, le processus de dilatation est plus fortement inhibé. Par conséquent, la déformation dans une matrice grossière implique la flexion de fibres synthétiques pour s'adapter au changement de la configuration relative des grains dans le processus de déformation. Ceci, à son tour, améliore l'interaction entre les grains de sable et les fibres. Cependant, cela ne se produit pas lorsque les grains sont petits par rapport aux fibres (sable fin), car les changements dans la configuration relative des grains pendant la déformation sont faibles par rapport à l'épaisseur de la fibre.



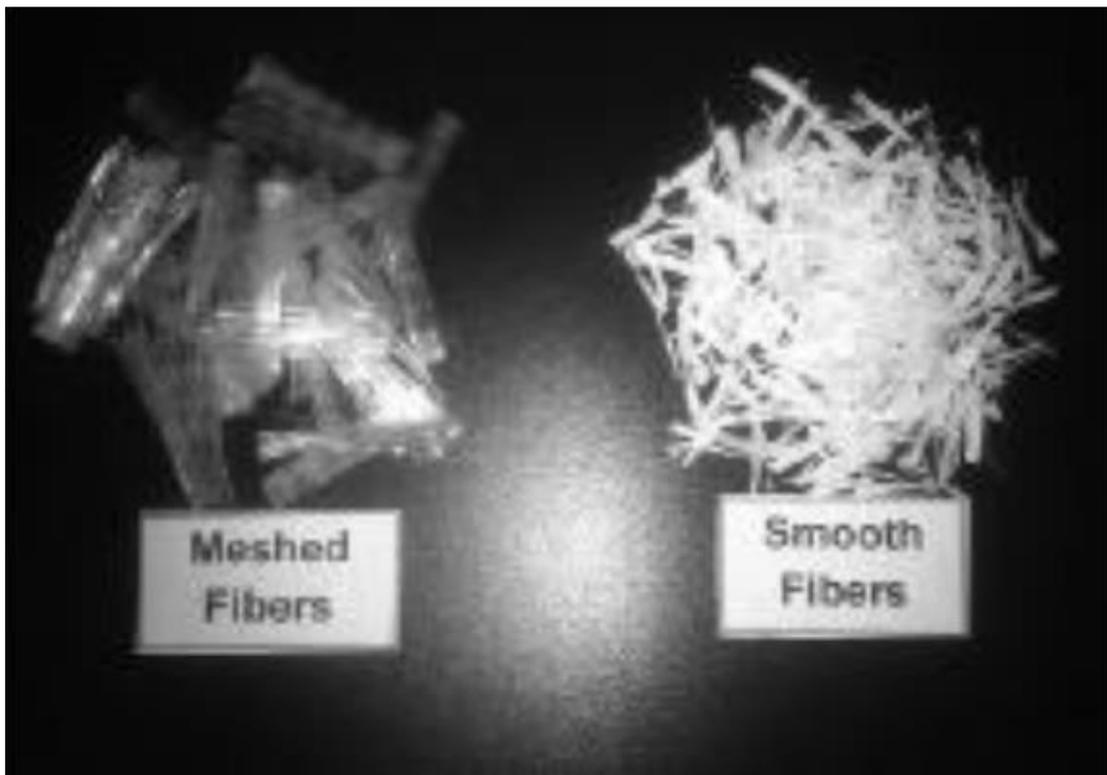
**Figure 2.3:** Grains de sable et fibres de polyamide (0.3 mm de diamètre):  
 (a) sable fin et (b) sable grossier (Al-Rafeai, 1991)

Michalowski et Cermak(2003) ont établi que l'effet des fibres dépend de la taille relative des fibres et des grains, où le renforcement est plus efficace lorsque la longueur de la fibre est grande par rapport à la taille des grains. La longueur des fibres doit être supérieure d'au moins un ordre de grandeur à la taille des grains, sinon le tissu du composite ne permet pas une interaction sable-fibre efficace. Une fois que la longueur des fibres se rapproche de la taille des grains (et des pores), aucun effet de renforcement ne peut être activé. De même, l'interaction sable-fibre devient inhibée lorsque l'épaisseur des fibres devient très faible par rapport à la taille des grains. Dans ce cas, l'interaction mécanique des grains (ou grappes de grains) et des fibres se produit par un effet de « courroie-friction » comme dans le renforcement continu des filaments (Michalowski, 1997).

## 2.4.2. Effet des propriétés des fibres

### 2.4.2.1. Forme des fibres

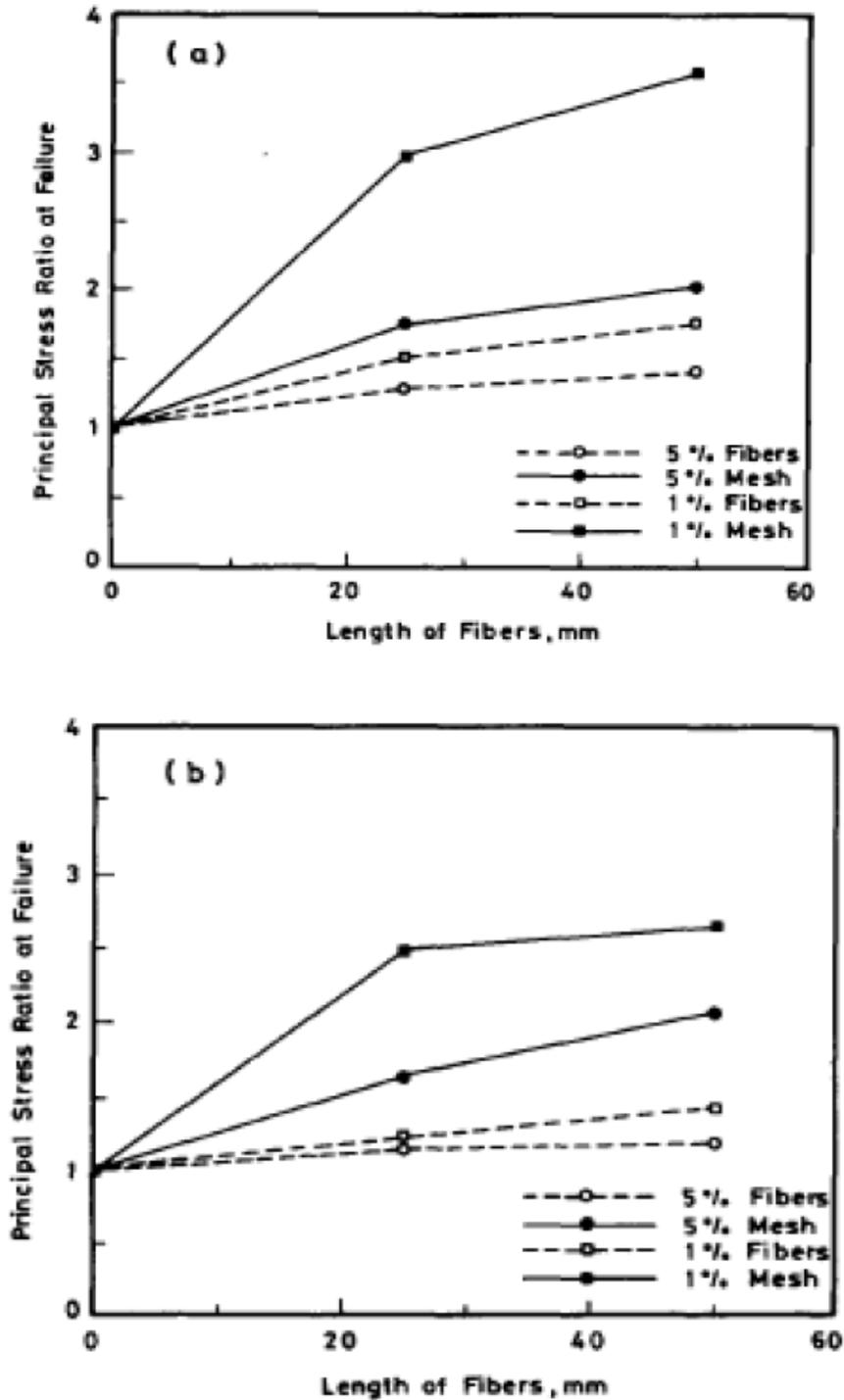
Al-Rafeai(1991) a entrepris des essais triaxiaux en utilisant trois types de renforts; deux de polypropylène et un de verre. Un type de renfort en polypropylène se présentait sous la forme d'éléments de mailles longs de 25 et 50 mm dans une fibre de couleur du sol découpée dans une fibre de polypropylène fibrillé. Le second type était une fibre de pulpe qui était une fibre blanche coupée au hasard de 2 à 12 mm (Figure 2.4). Le type de fibre de verre utilisé était une mèche hachée coupée en longueurs de 10, 25, 50, 75 et 100 mm.



**Figure 2.4:** Fibres maillées et lisses (Al-Rafeai 1991)

L'effet de la forme d'inclusion sur la résistance des sables renforcés est montré sur la figure 2.5 où la relation entre le rapport de contrainte principal à la rupture, la longueur des fibres de verre et des éléments de maille est présentée. Dans les échantillons de sable fin, le rapport de contrainte principale des échantillons renforcés par des mailles augmentait linéairement avec l'augmentation de la longueur de l'élément de maillage. L'effet de la forme d'inclusion sur la résistance du sable renforcé était évident. Pour le sable moyen, des tendances similaires peuvent être observées, la figure 2.5b montre que l'augmentation de la résistance est essentiellement proportionnelle à la longueur de la fibre pour une concentration en fibres donnée. La résistance des spécimens renforcés avec des éléments de maille de 1% est restée la même avec l'augmentation de la longueur de maille

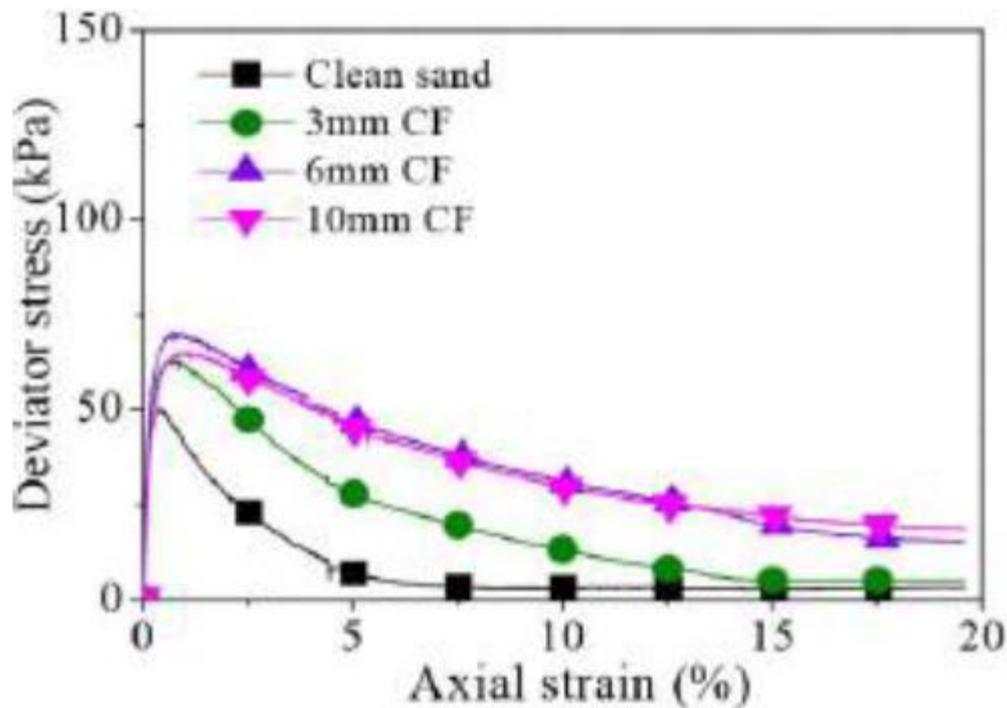
au-delà de 50 mm. Il est donc clair qu'avec des inclusions plus extensibles (éléments de maille), l'amélioration de la résistance des sables renforcés est significativement plus grande que celle des mêmes sables renforcés de fibre de verre rigide à cause du grand nombre présent de mailles par unité de volume de composite et l'interaction de leur filet avec les grains du sol.



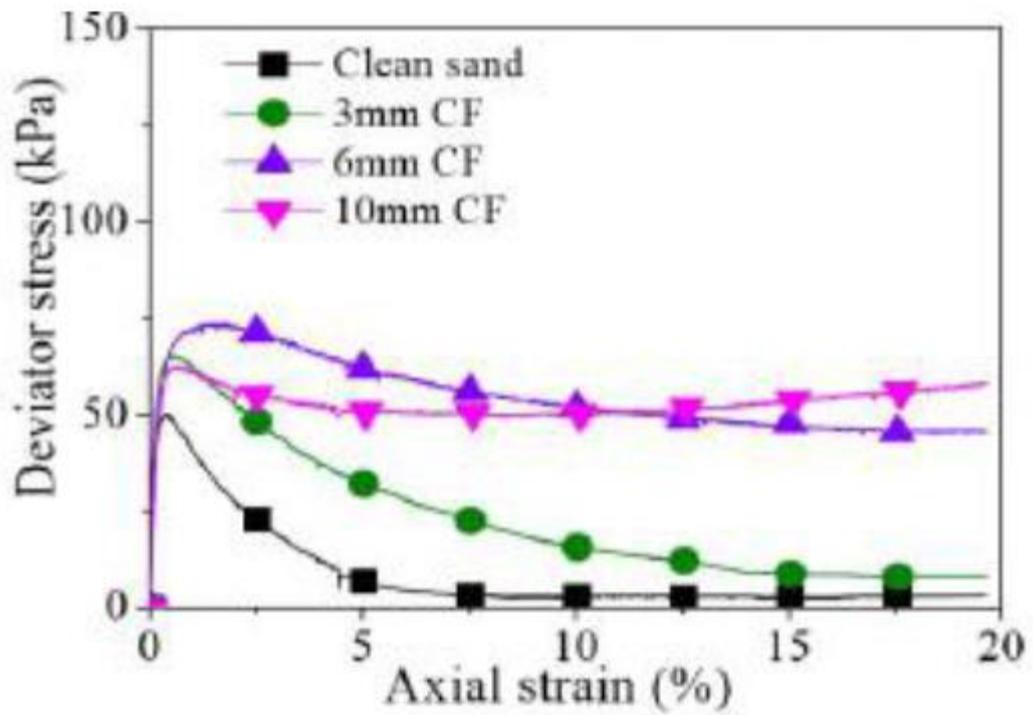
**Figure 2.5:** Taux de contrainte principal à la rupture en fonction de la longueur des fibres et des mailles pour (a) sable fin et (b) sable moyen (AI-Refeai, 1991)

### 2.4.2.2. Longueur des fibres

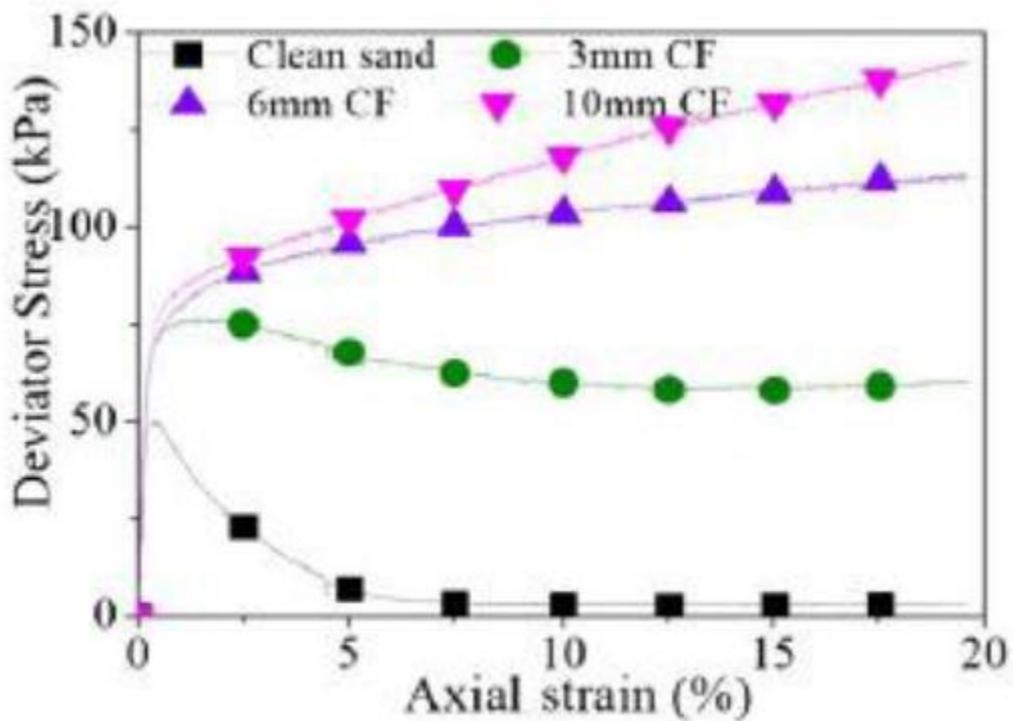
L'amélioration de la résistance à la rupture est liée à la longueur de la fibre, plus la longueur des fibres augmente plus la résistance au cisaillement augmente (Consoli et al. 2007). Bao et al. (2020) ont réalisé des tests triaxiaux consolidés non drainés (CU) pour étudier le comportement d'un sol sableux renforcés par fibre de carbone (CF) sous une pression de confinement de 100 kPa et une densité relative de 15%. Concernant les performances de ce dernier les résultats expérimentaux ont prouvé que la longueur des fibres a un effet substantiel sur le déviateur de contrainte du sable. Dans l'ensemble, le déviateur de contrainte des échantillons renforcés a été amélioré pour toutes les longueurs de fibre étudiée, et la croissance de la pression interstitielle a été limitée. Pour l'échantillon renforcé avec 3 mm, l'amélioration de la résistance n'était pas aussi bonne que pour les échantillons renforcés avec 6 mm et 10 mm CF. Avec une teneur en CF de 1%, l'échantillon renforcé avec 10 mm de CF a montré le déviateur de contrainte la plus élevée, soit 63.7% de plus que le sable non renforcé. Pendant ce temps, la contrainte de déviateur post-pic de l'échantillon a atteint 142.28 kPa à une déformation de cisaillement de 20%, soit 142.3% et 25.4% de plus que les échantillons renforcés avec 3 mm et 6 mm CF, respectivement (Figure 2.6).



(a) 0.2% CF



(b) 0.5% CF

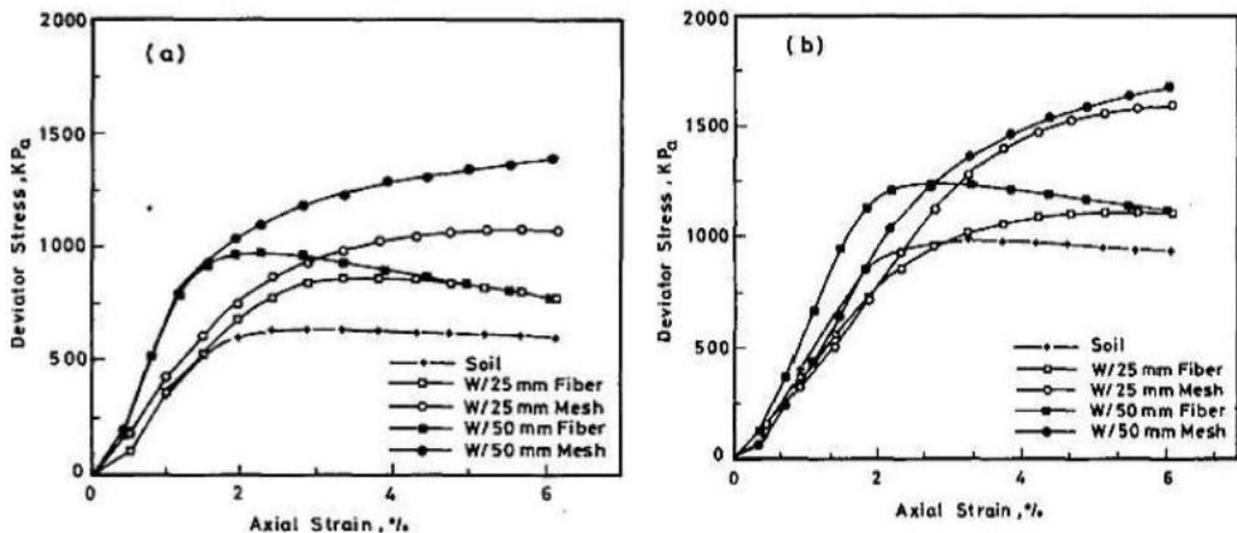


(c) 1% CF

**Figure 2.6:** Effet de la longueur de la fibre sur le déviateur de contrainte d'un composite sable sableux-fibre à une teneur de 1% (Bao et al. 2020).

Al-Refeai (1991) a utilisé des spécimens avec des fibres de verre de différentes longueurs mais de même diamètre pour étudier l'effet de la longueur des fibres sur l'amélioration de la résistance de

deux sables à une contrainte de confinement de 200 kPa. Il a été trouvé que plus la fibre est longue, plus l'effet de la fibre est important. Cette tendance semble être plus forte avec des échantillons ayant une plus grande teneur en fibres. Ceci a été anticipé car lorsque la friction est entièrement mobilisée sur la longueur du renfort, la force de traction dans le renfort est proportionnelle à sa longueur. Si la fibre est suffisamment longue, la charge est transférée par une contrainte de cisaillement interfaciale moyenne, et la contrainte de traction longitudinale dans la fibre varie de zéro aux extrémités de la fibre à la contrainte de rupture. Pour une fibre courte, il n'y a pas assez de contrainte accumulée pour mobiliser la contrainte de traction de rupture de fibre (Figure 2.7).

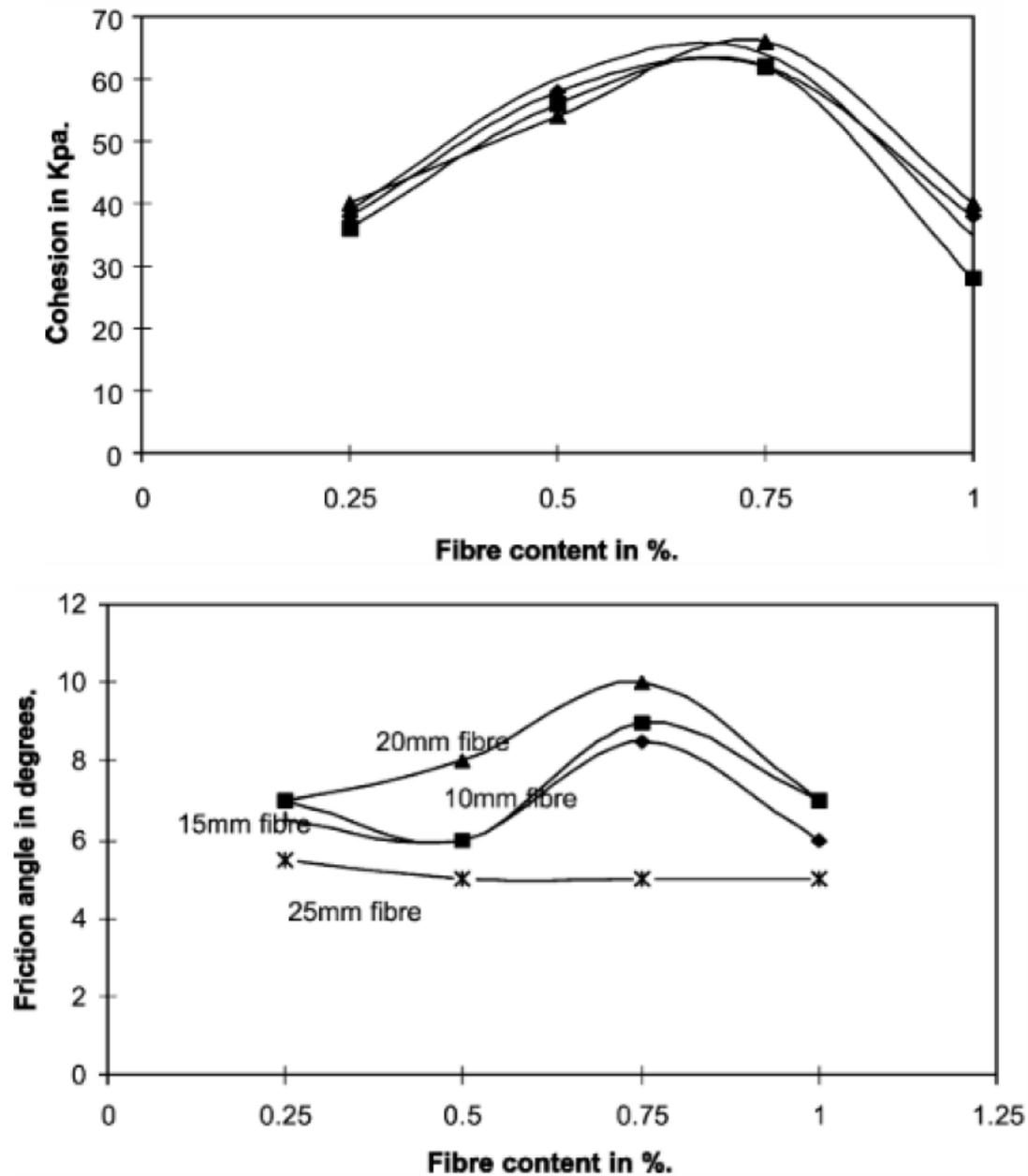


**Figure 2.7:** Relation contrainte-déformation de sable renforcé pour: (a) sable fin et (b) sable moyen.

$\sigma_3 = 200$  kPa (Al-Refeai, 1991).

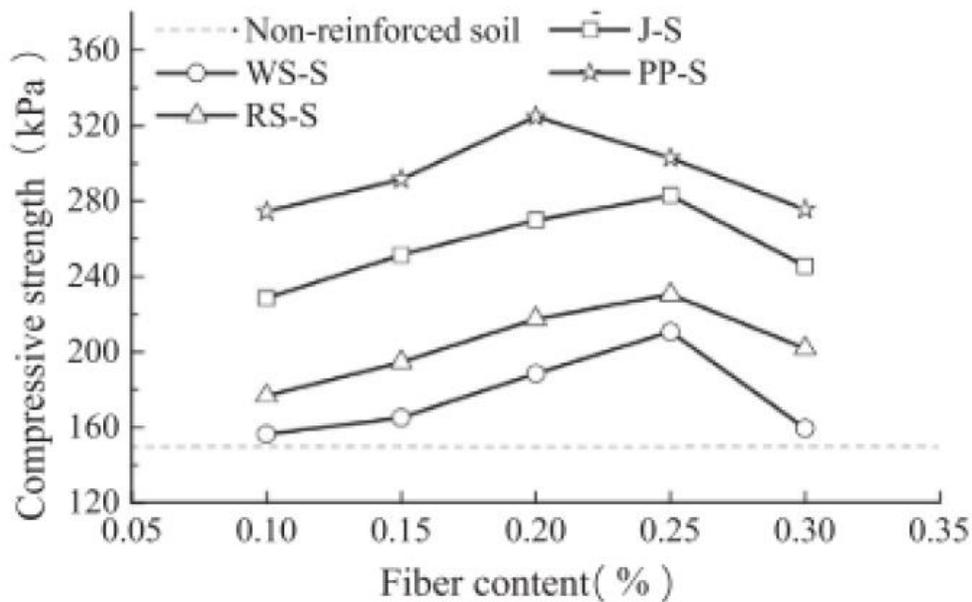
### 2.4.2.3. Teneur en fibres

Plusieurs essais concernant l'effet de la teneur en fibre sur la résistance au cisaillement ont été réalisés (Gray et al., 1983; Gray et Al-Refeai, 1986; Maher et Ho, 1994; Santoni et al., 2001; Ranjan et al., 1996; Michalowski et Cermak 2003; Consoli et al., 1999; Consoli et al., 2003; Consoli et al., 2007; Casagrande et al., 2006; Chegenizadeh et Nikraz 2012). En effet, la teneur en fibres joue un rôle très important dans l'amélioration de la résistance au cisaillement du composite (sol-fibre) jusqu'à un certain pourcentage, au-delà duquel son effet n'est pas observé. Parakar et Sridhar (2002) ont rapporté que le pourcentage de teneur en fibres influence la résistance au cisaillement, car la contrainte de cisaillement augmente de manière non linéaire avec l'augmentation de la teneur en fibres. Mais cependant au-delà de 0.75% de teneur en fibres, la contrainte de cisaillement diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres (Figure 2.8).



**Figure 2.8:** Variation des caractéristiques mécaniques C et  $\phi$  en fonction de la teneur en fibres (Parakar et al. 2002).

Li et al. (2018) expliquent qu'avec l'augmentation de la teneur en fibres, la surface de contact entre les fibres et les particules de sol augmente, entraînant une augmentation du frottement à l'interface. En même temps, les fibres peuvent générer de nombreux points de croisement et créer des réseaux de fibres qui renforcent l'effet de confinement spatial dans le sol. Par conséquent, la force du mélange augmente jusqu'au maximum. Après le pic de résistance, la teneur en fibres dépasse la valeur limitée, les fibres ne sont pas toujours dispersées de manière uniforme dans le sol, en raison du chevauchement et du bobinage et sont susceptibles de donner des poches d'air et de créer des interfaces faibles diminuant par conséquent la résistance du mélange sol fibre (Figure 2.9).



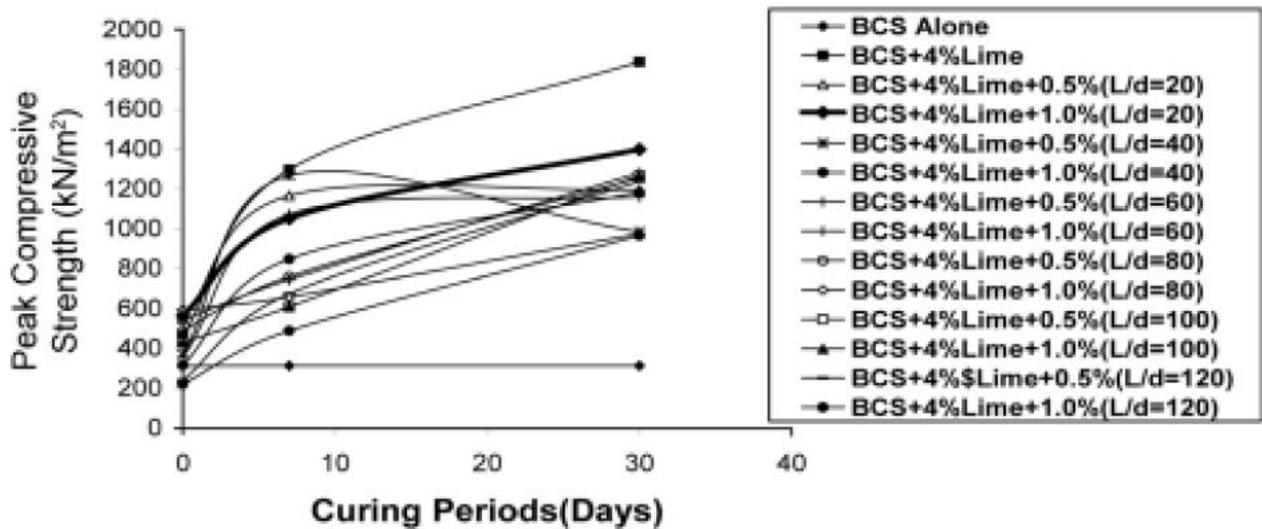
**Figure 2.9:** Valeur UCS du mélange sol- fibre par rapport au contenu en fibres (Li et al. 2018)

#### 2.4.2.4. Rapport d'aspects

Le rapport longueur  $L$  sur épaisseur (ou diamètre équivalent)  $D$  de la fibre est appelé rapport de forme ou rapport d'aspects  $a_r$ , il est défini par la relation suivante:

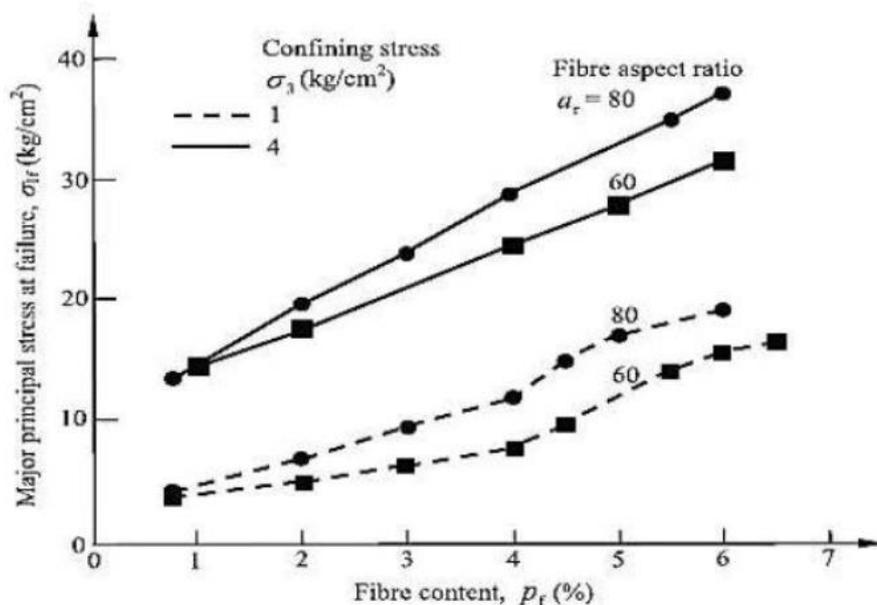
$$a_r = \frac{L}{D} \quad (2.1)$$

Plusieurs essais ont été réalisés afin de tester l'effet de ce rapport. Ramesh et al. (2010) ont constaté un gain de résistance pour un sol renforcé par des fibres de coco distribuées de manière aléatoire. Pour un rapport d'aspects de 20, une valeur de teneur en fibres optimale de 1% a été enregistrée. Par contre, pour un rapport d'aspect de 80, la teneur optimale en fibres enregistrée était de 0.5%. Toutefois pour les sols traités à la chaux et renforcés avec 1% de fibres de coco et ce pour un rapport de forme 20, le gain de résistance est plus important que celui des autres pourcentages et rapports de forme (Figure 2.10).



**Figure 2.10:** Résistance à la compression non confinée d'un sol avec divers pourcentages et rapport d'aspects de fibre de coco (CF) (Ramesh et al. 2010).

En effectuant des essais en compression triaxiale sur du sable renforcé par des fibres de verre répartis de façon aléatoire, Maher (1988) et Maher et Gray (1990) ont trouvé qu'une augmentation du rapport d'aspect de fibre résulte d'une faible contrainte latérale critique ( $\sigma_{3crit}$ ) et une plus grande contribution des fibres à la résistance au cisaillement. Ils ont aussi conclu que la résistance au cisaillement augmente linéairement avec l'augmentation de la teneur en fibres avec des rapports d'aspect supérieures ou égales à 60 (Figure 2.11).

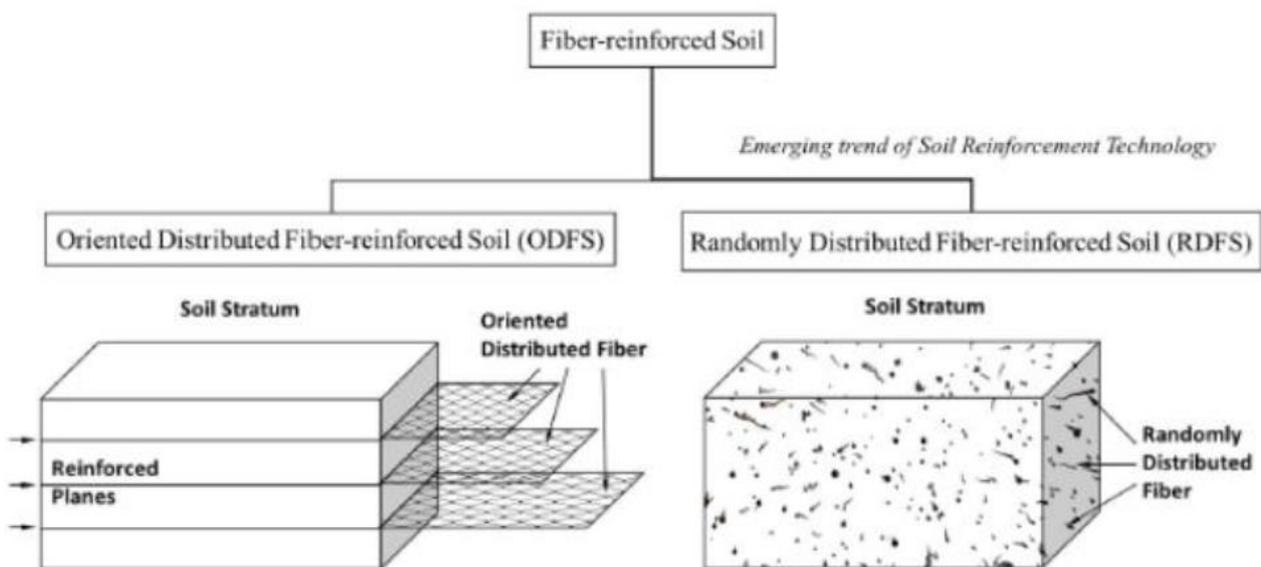


**Figure 2.11:** Effet de la teneur en fibres de verre et du rapport d'aspect sur la résistance à la rupture du sable de Muskegon aux contraintes de confinement faibles et élevées (Maher et Gray, 1990).

Cependant, Wang et al. 2017 ont rapporté que la longueur des fibres acquiert un rôle plus important que le diamètre des fibres dans les pratiques d'ingénierie des sols en fibres distribuées de manière aléatoire. Comme il existe naturellement un diamètre de fibre inhérent avec une très faible importance dans les écarts-types, la résistance accrue du sol renforcé est capturée de manière vitale par la longueur des fibres discrètes qui influence directement les interactions dans les sols.

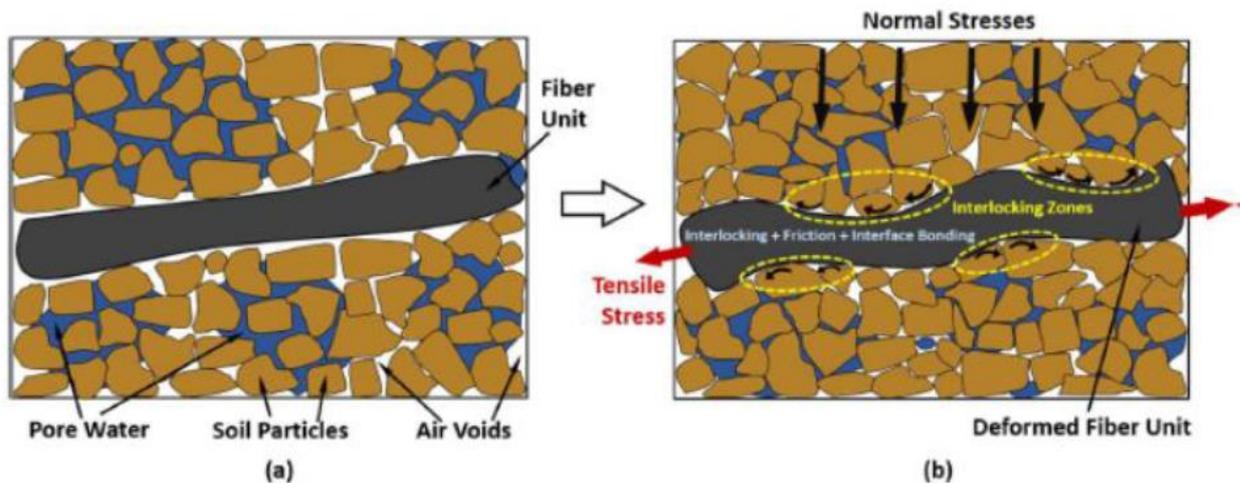
#### 2.4.2.5. Orientation des fibres

Sharma et al. (2015) et Bordoloi et al. (2017) classent les sols renforcés par fibres en deux catégories en fonction de leur méthode d'application: les sols renforcés de fibres distribués et orientés (ODFS) et les sols renforcés de fibres distribués de façon aléatoire (RDFS). Les diagrammes schématiques d'ODFS et RDFS sont clairement illustrés dans la figure 2.12 (Gowthaman et al. 2018). ODFS est le mécanisme de renforcement bien connu où les fibres naturelles peuvent être introduites par des systèmes de planification dans les directions verticales, horizontales ou dans les deux sens. Le mécanisme de l'ODFS est similaire aux approches géosynthétiques conventionnelles dans lesquelles des matériaux ont été introduits dans les plans les plus faibles du sol comme les géo-grilles, les géo-cellules, les géo-tapis, les géotextiles....etc. Maher et al. (1990) évoquent implicitement que la technique ODFS mobilise une résistance au frottement supplémentaire le long des plans renforcés de fibres alors que les zones non renforcées nécessitent la survie par leur propre force mais des possibilités existent encore pour générer des plans de rupture à travers des zones non renforcées plus faibles.



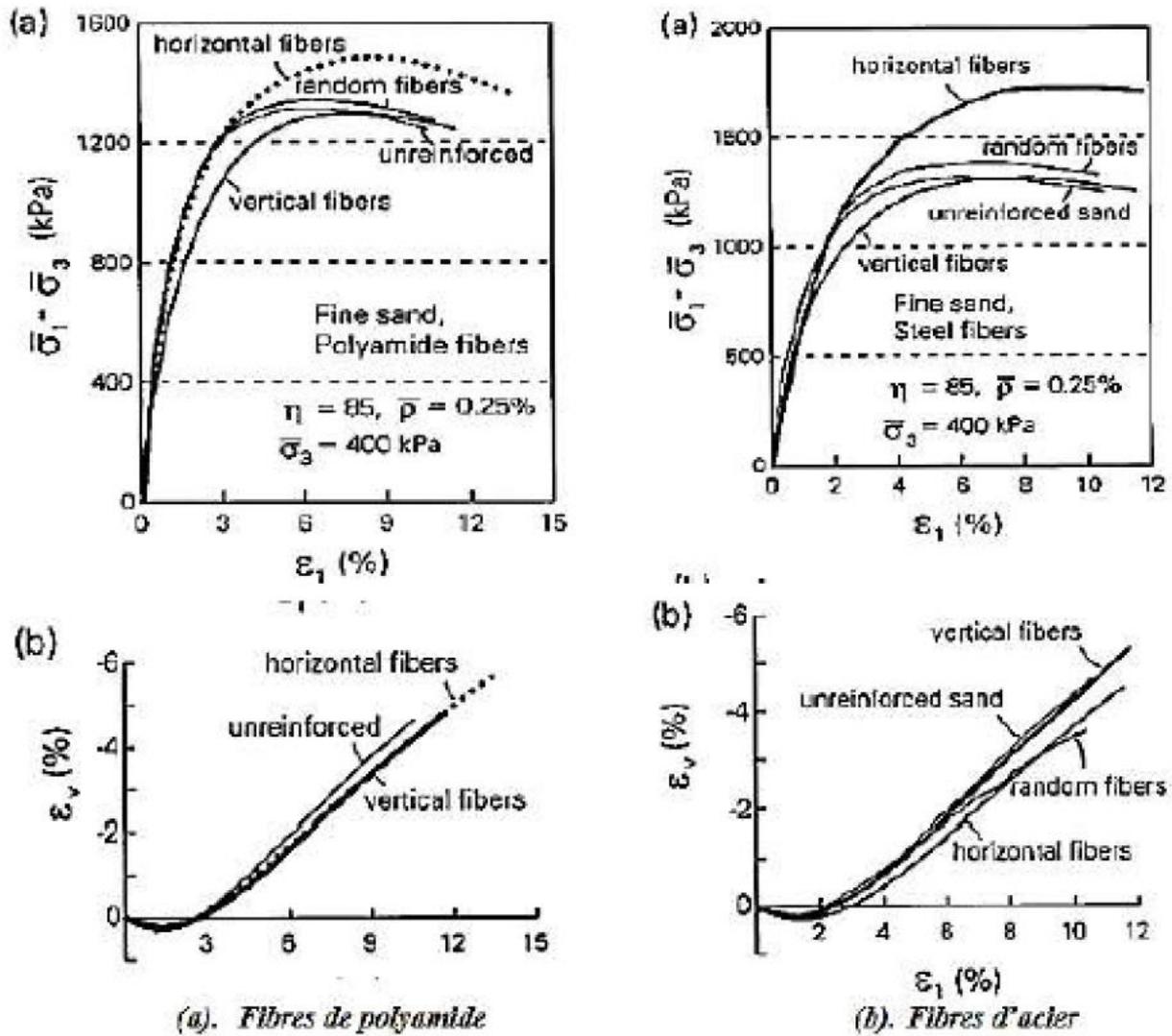
**Figure 2.12:** Classification et illustration du mécanisme de renforcement des fibres du sol (Gowthaman et al. 2018).

D'autre part, RDFS est une technique bien connue d'amélioration du sol dans laquelle les fibres composées de la propriété et de la quantité désirées sont assorties au hasard et compactées in situ. L'incorporation de RDFS est devenue plus populaire ces jours-ci, car de courtes fibres discrètes peuvent être simplement ajoutées et mélangées au hasard avec de la terre, ce qui peut fournir une augmentation isotrope de la résistance du composite de sol sans introduire de plans de faiblesse continus. La méthode RDFS exploite le comportement similaire des racines des plantes, ce qui renforce le sol en contribuant à des frottements et des emboîtements supplémentaires (Figure 2.13).



**Figure 2.13:** Représentation schématique d'une unité de fibre distribuée de façon aléatoire à: (a) l'étape initiale (b) l'étape de déformation due au chargement, où l'effet de l'enclenchement du frottement et de la liaison d'interface induit la mobilisation de la contrainte de traction sur l'unité de fibre (Gowthaman et al. 2018).

De nombreuses études expérimentales publiées supposent implicitement que les fibres sont orientées au hasard dans toute la masse du sol. Une telle distribution d'orientation permettrait de préserver l'isotropie de la résistance du sol et éventuellement d'éviter ou de retarder la formation de plans de déformation localisés. Une série d'essais de compression triaxiale drainée sur des échantillons de sable renforcé et non renforcé avec des fibres de polyamide et de fibres d'acier avec trois orientations différentes (une disposition verticale, une disposition horizontale et une répartition aléatoire) réalisée par Michalowski et Cermak (2002) ont montré que la contribution des fibres à la résistance du sol composite est très importante quand les fibres sont placées dans le sens horizontal de l'échantillon. Les fibres disposées dans le sens vertical ont été soumises à une compression et ne contribuèrent pas à une augmentation de la résistance au cisaillement. Les fibres disposées de façon aléatoire ont présenté de faibles résistances par rapport à ceux disposées horizontalement, compte tenu qu'une partie de ces fibres est soumise à une compression (Figure 2.14).

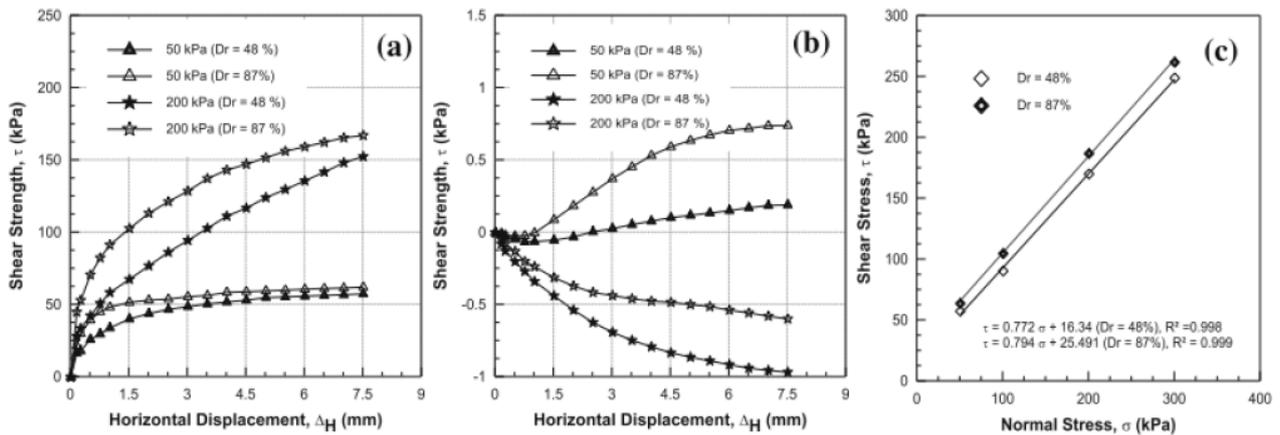


**Figure 2.14:** Courbes de contrainte-déformation horizontale déformation volumique pour un sable fin renforcé pour différentes orientations de fibre (Michalowski et Cermak, 2002).

### 2.4.3. Influence des conditions d'essai

#### 2.4.3.1. Densité relative

Benessalah et al. (2015) ont réalisé des essais à la boîte de cisaillement sur un sable de Chlef renforcé par des fibres de verre distribuées de façon aléatoire. Les résultats illustrés dans la figure 2.15 indiquent que les caractéristiques mécaniques et la contrainte de cisaillement des échantillons denses sont supérieures à celles des échantillons moyennement denses. Aussi, il semble qu'une valeur de confinement supérieure augmente la contractance des échantillons.



**Figure 2.15:** Effet du confinement et de la densité sur la résistance au cisaillement du sable humide ( $w = 3\%$ ) renforcé par une teneur volumique en fibres de 0.3%: (a) contrainte de cisaillement en fonction de la déformation horizontale, (b) effet de la pression de confinement et de la densité relative sur la déformation verticale, (c) courbe intrinsèque de l'équation  $\tau = \sigma \tan \phi + c$  (Benessalah et al. 2015).

Des essais de cisaillement annulaire sur le sable renforcé de fibres saturé ont été réalisés par Jin Liu et al. (2011). Les échantillons ont été divisés en trois groupes (états lâche, moyennement dense et dense), en fonction de leur comportement en cisaillement non drainé. Les résultats expérimentaux (Figure 2.16, 2.17 et 2.18) semblent indiqués que les interactions mécaniques inter faciales entre la fibre et le sable dépendent fortement de la densité sèche du sable et de la teneur en fibres. Le sable libre correspond à un taux de vide plus élevé et à des diamètres de pores plus importants. Il est supposé que lorsque l'échantillon était saturé, une partie de la fibre était séparée des particules de sable. Après le cisaillement de l'échantillon, la fibre peut se déplacer facilement et n'a aucun effet sur le comportement de liquéfaction statique des échantillons saturés. En outre, la fibre n'occupe qu'une partie du volume des pores de l'échantillon dans les échantillons à faible densité, de sorte que la faible teneur en fibres ne modifie guère le comportement au cisaillement du sable saturé. Une augmentation de la densité du sable donne lieu à une zone de contact inter faciale plus efficace entre la fibre et la matrice de sable. Ce qui se traduira par une plus grande force de contact et de verrouillage entre les particules de sable adjacentes et une plus grande déformation plastique et rugosité des surfaces des fibres.

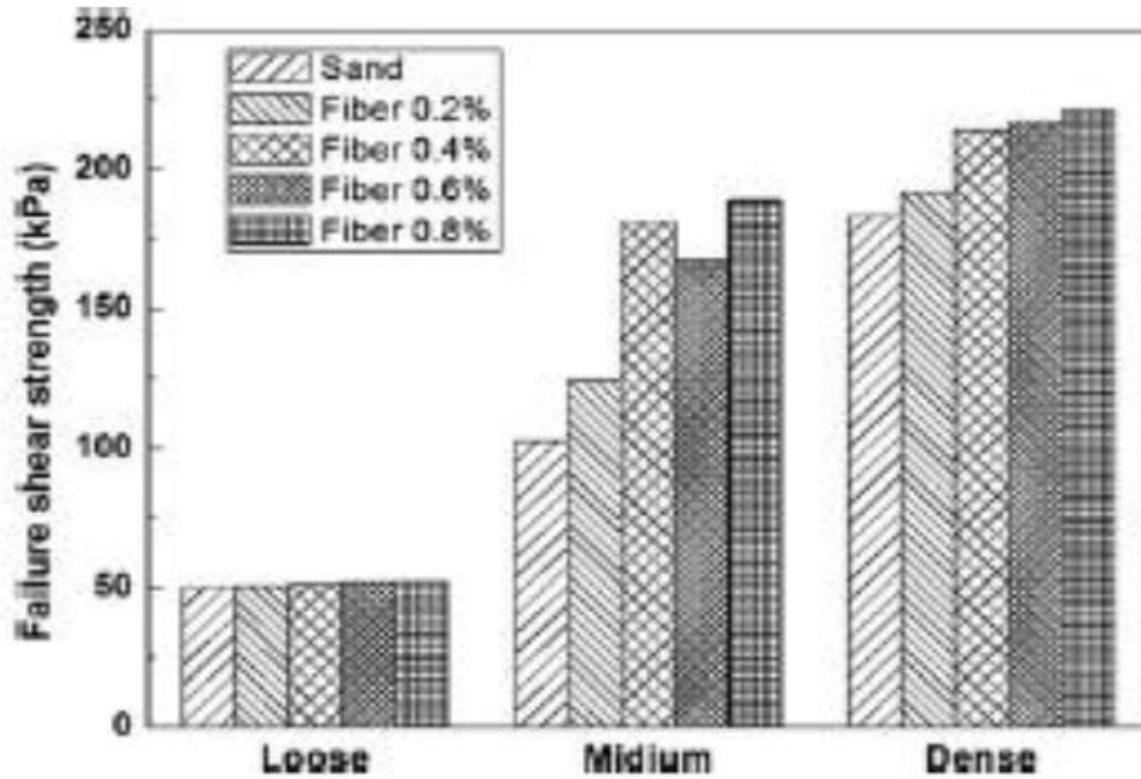


Figure 2.16: Résistance au cisaillement des échantillons non renforcés et renforcés avec trois densités différentes (Jin Liu et al. 2011).

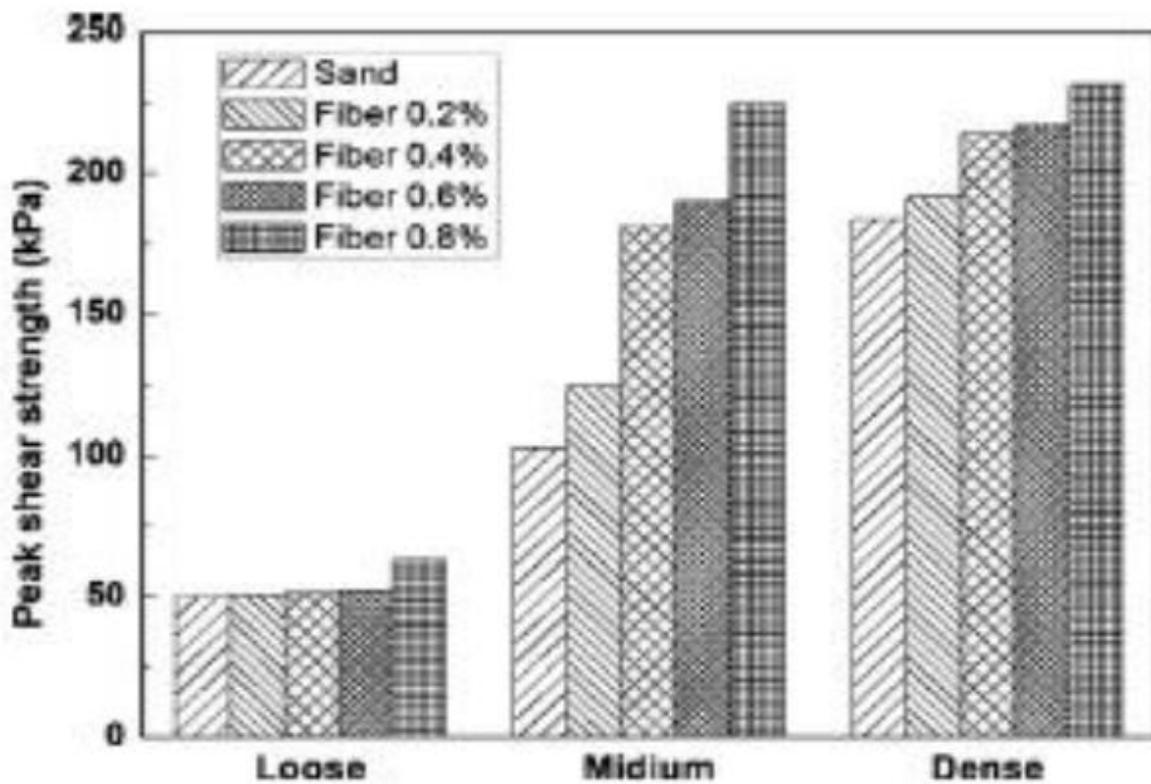
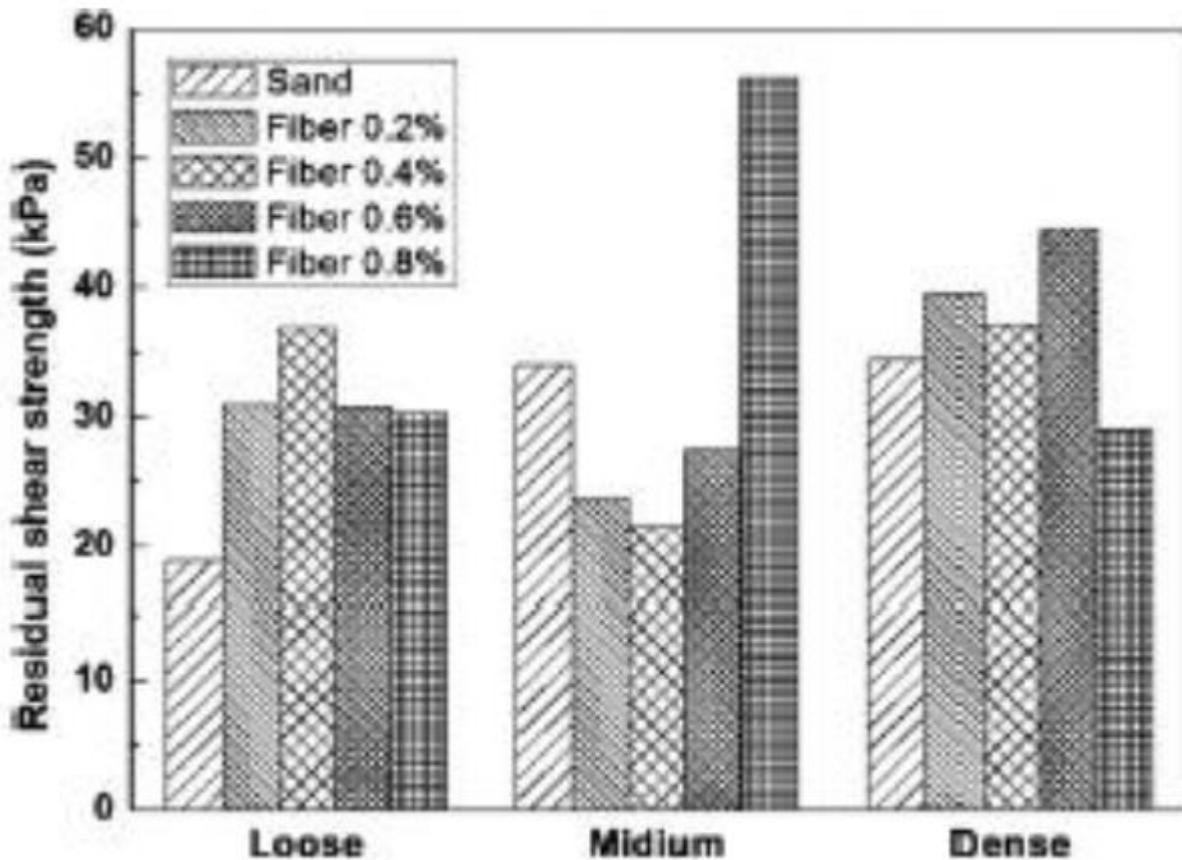


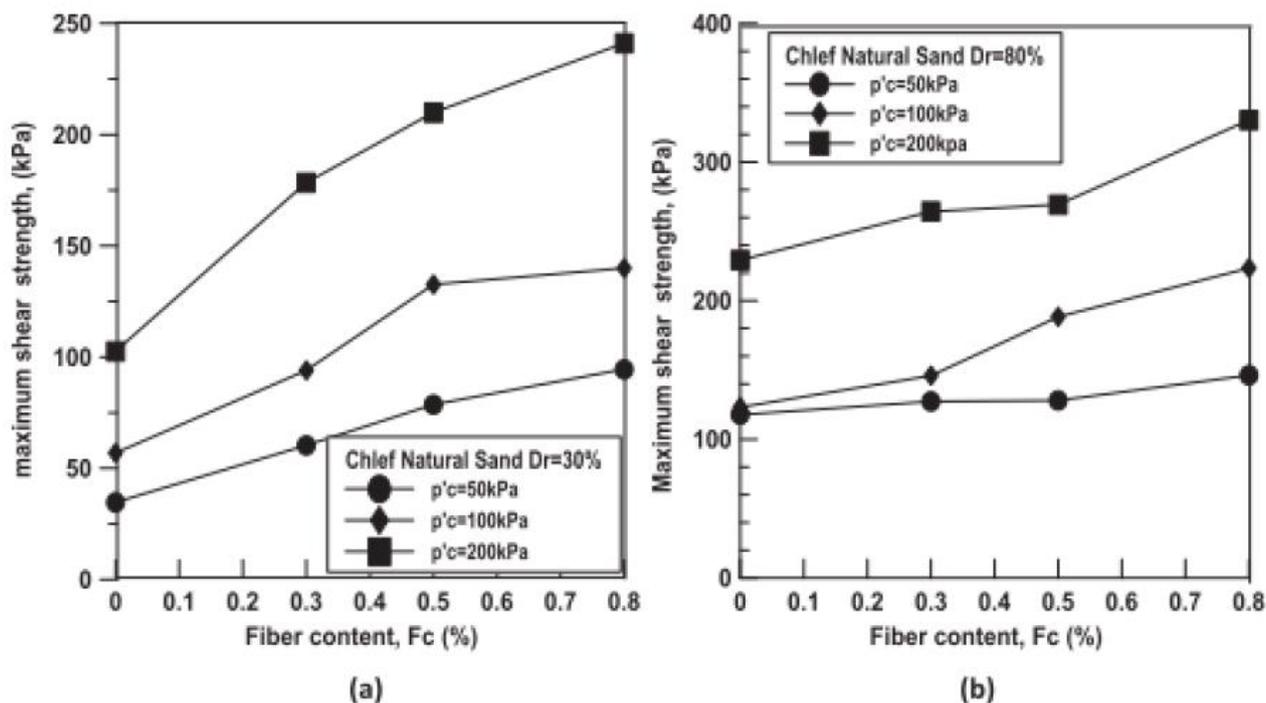
Figure 2.17: Résistance maximale au cisaillement des échantillons non renforcés et renforcés avec trois densités différentes (Jin Liu et al. 2011).



**Figure 2.18:** Résistance résiduelle au cisaillement des échantillons non renforcés et renforcés avec trois densités différentes (Jin Liu et al. 2011).

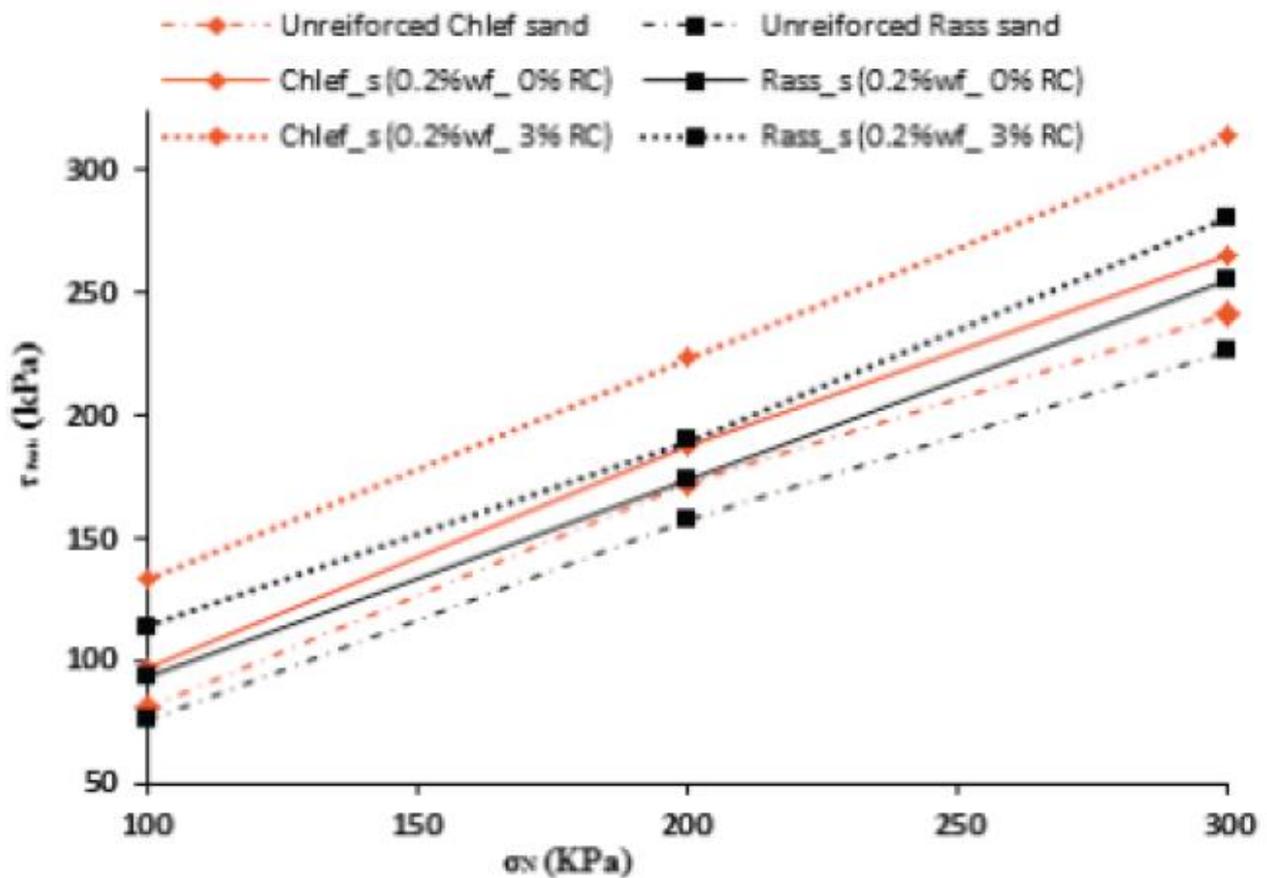
#### 2.4.3.2. Contrainte de confinement et contrainte normale

La contrainte de confinement a un effet similaire à celui de la densité relative dans l'amélioration de la résistance au cisaillement des sols renforcés par fibres (Benessalah et al. 2015). Khebizi et al. (2018) en réalisant une série d'essais de compression triaxiale monotones non drainés sur du sable de Chlef non renforcé et renforcé par des fibres de polypropylène à différentes teneurs en fibres ( $F_c = 0, 0.3, 0.5$  et  $0.8\%$ ) pour deux densités relatives différentes, ont trouvé que l'effet du renforcement est plus prononcé à des contraintes de confinement plus élevées (Figure 2.19).



**Figure 2.19:** Résistance maximale au cisaillement en fonction de la teneur en fibres pour un sol renforcé à différentes pressions de confinement : (a) état lâche, (b) état dense (Khebizi et al. 2018).

Bouaricha et al. (2017) ont entrepris une série d'essais de cisaillement direct sur deux types de sable (sable de Chlef et sable d'oued Rass), renforcés de clinker et de fibres de verre, afin d'étudier les paramètres de résistance au cisaillement des sables traités et renforcés de fibres distribuées de manière aléatoire. Les résultats expérimentaux montrent clairement que la résistance maximale au cisaillement des deux sables renforcés par fibres et de résidus de clinker augmente de manière significative lorsque la contrainte normale augmente de 100 kPa à 300 kPa, pour les sols non renforcés et renforcés (Figure 2.20).

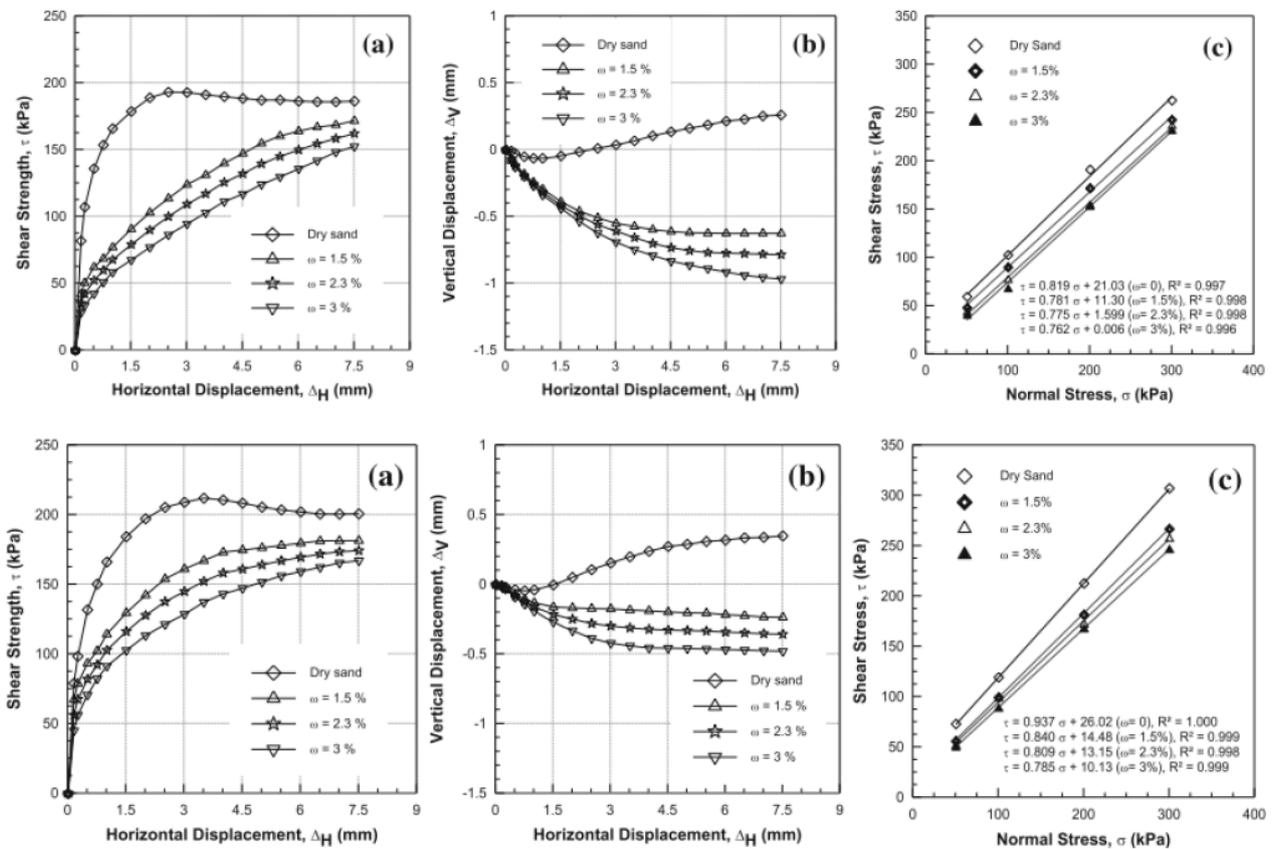


**Figure 2.20:** Évolution de la résistance maximale au cisaillement par rapport à la contrainte normale du composite sable-fibre-résidu de clinker (Bouaricha et al. 2017).

### 2.4.3.3. Teneur en eau

Plusieurs études ont été menées afin d’investiguer l’effet de la teneur en eau sur le comportement mécanique des sols renforcés. Ces études ont prouvé que l’augmentation de la teneur en eau provoque une diminution remarquable des caractéristiques mécaniques. Tang et al. (2010) ont mesuré de manière quantitative la résistance au cisaillement interfaciale d’un sol renforcé de fibres en effectuant un essai d’arrachement d’une fibre. Les résultats ont indiqué que la résistance au cisaillement interfaciale était réduite de 177 kPa à 146 kPa. Des résultats similaires ont été obtenus par Benessalah et al. (2015) à travers une série d’essais de cisaillement direct sur un sol sableux de la région de Chlef (Algérie) renforcé avec différents teneurs en eau et différents pourcentages de fibres de verre (10 mm de longueur) et à des contraintes normales verticales de 50, 100, 200 et 300 kPa. Les résultats expérimentaux montrent clairement que les caractéristiques mécaniques du sol diminuent avec l’augmentation de la teneur en eau (Figure 2.21). En effet, l’eau joue un rôle important dans la lubrification de la couche de l’interface fibre / sol, et par suite, l’augmentation de

la teneur en eau de l'interface fibre / sol. Par conséquent, l'augmentation de la teneur en eau peut induire une diminution des frictions et de la cohésion interfaciales.

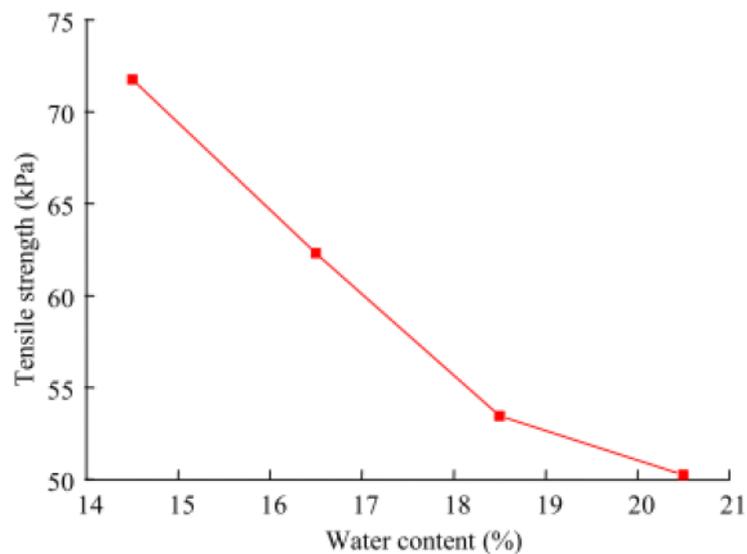


**Figure 2.21:** Effet de la teneur en eau sur le comportement mécanique du sable renforcé à 200 kPa de contrainte verticale pour des échantillons: (a). Moyennement denses ( $D_r = 48\%$ ) et (b). Dense ( $D_r = 87\%$ ) (Benessalah et al. 2015).

Afin de comprendre l'influence de la teneur en eau sur la résistance à la traction du sol, Li et al. (2014) entreprirent une série d'essai de traction directe sur quatre groupes d'échantillons présentant des teneurs en eau différentes, à savoir 14.5%, 16.5%, 18.5% et 20.5%. Les résistances à la traction obtenues sont présentées dans la figure 2.22. Ils ont constaté que l'augmentation de la teneur en eau entraîne une diminution de la résistance à la traction. Lorsque la teneur en eau a été augmentée de 14.5% à 20.5%, la résistance à la traction a été réduite de 30%, de 71,75 à 50,25 kPa. Cette observation peut être expliquée à partir des deux aspects suivants:

- La cohésion diminue avec l'augmentation de la teneur en eau, ce qui affaiblit les liens entre les particules de sol;

- L'augmentation de la teneur en eau peut également affaiblir les interactions mécaniques interfaciales entre la fibre et la matrice du sol et réduire la capacité de la fibre à supporter la charge de traction.

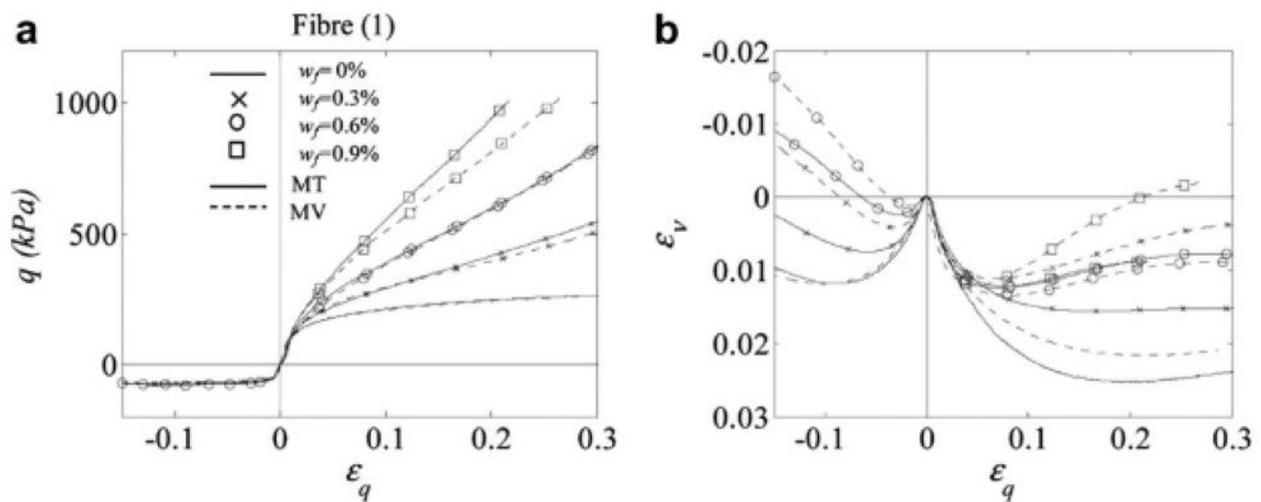


**Figure 2.22:** Variation de la résistance à la traction du sol en fonction de la teneur en eau (Li et al. 2014).

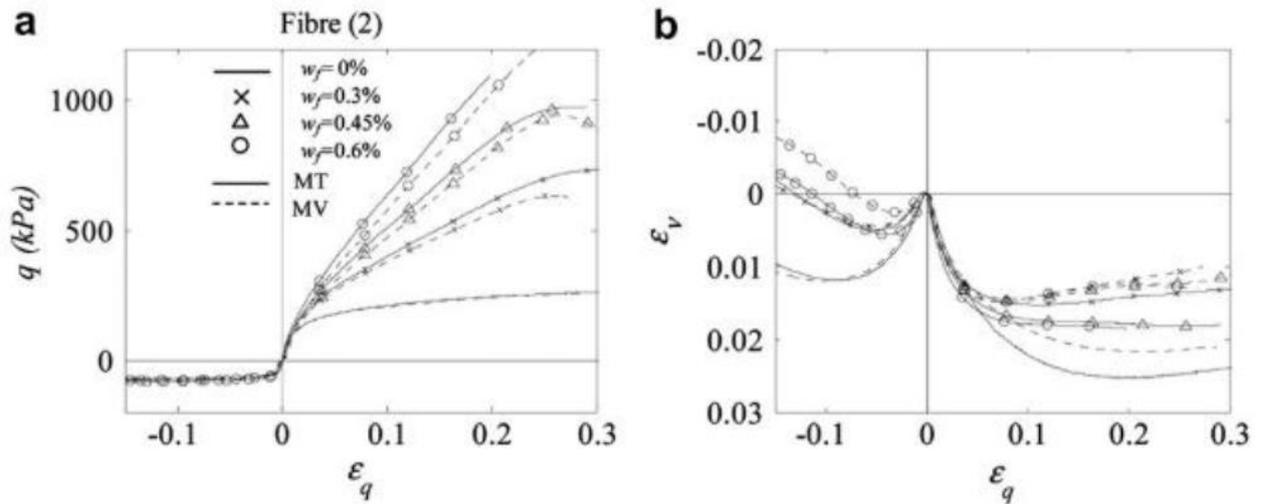
#### 2.4.3.4. Technique de préparation des échantillons

On dénombre plusieurs techniques et méthodes de préparation d'échantillons de sols pulvérulents dans les laboratoires. Les techniques auxquelles il est le plus recouru par les chercheurs sont: le compactage humide (MT), la pluviation à sec (AP), la pluviation humide (WP), la déposition à sec par entonnoir (DFD) et la sédimentation à l'eau (WS). L'utilisation d'une technique est déterminée, selon Romero (2003), par les conditions in situ du sol à étudier, et par la densité relative initiale que l'on désire obtenir. La technique la plus souvent utilisée dans la préparation des échantillons de sol renforcés par fibres est celle du damage humide (MT). De nombreuses études réalisées au laboratoire ont implicitement supposé que la technique la plus appropriée dans la préparation des échantillons renforcés par fibres est la technique du damage humide (MT). Le choix de cette technique est dû à ses différentes qualités; elle permet, d'après Ibraim et al. (2012), d'éviter la ségrégation des particules du matériau composite ce qui assure un bon contrôle de la densité de l'échantillon et de la répartition homogène des fibres. La technique du damage humide (MT) fournit une répartition aléatoire des orientations des fibres dans toute la masse du sol, ce qui se répercute fondamentalement sur la réponse mécanique des sols renforcés. Cette répercussion a fait l'objet de plusieurs études (Jewell et Wroth, 1987; Palmeira et Milligan, 1989; Michalowski et Cermák, 2002) en imposant des orientations préférentielles de fibres. Cependant Michalowski (2008) a

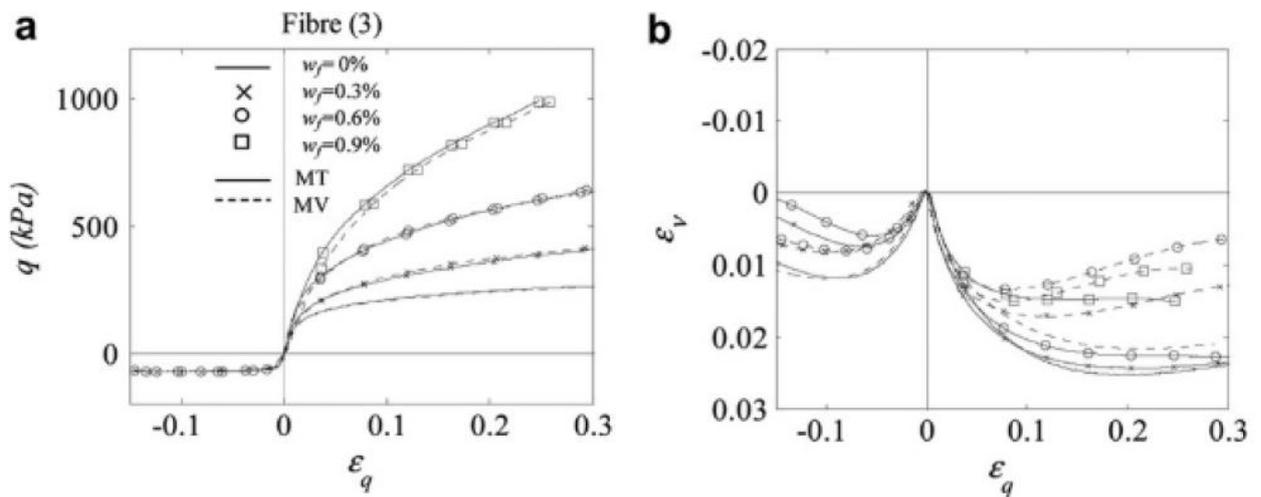
constaté que les orientations des fibres issues de cette technique de fabrication sont susceptibles d'être anisotrope avec un plan de stratification horizontale préférée. Ibraim et al. (2012) ont réalisé une série d'essai à l'appareil triaxial sur des échantillons renforcés par des fibres de polypropylène en adoptant une nouvelle procédure de fabrication à savoir la technique de vibration de sable humide (MV) et la méthode de damage humide (MT). Les résultats expérimentaux montrent que les échantillons préparés par damage humide (MT) présentent une résistance à la compression légèrement supérieure à celle des échantillons préparés par vibration du sable humide (Figure 2.23a). A partir des deux méthodes de fabrication, le comportement volumétrique du sable renforcé en compression ainsi qu'en extension, montre une approche de la réponse caractéristique d'un sol granulaire à l'état dense. Après une réduction initiale du volume, celle-ci est moins importante que pour le sable non renforcé, il a été constaté que la dilatance augmente avec l'accroissement de la teneur en fibres (Figure 2.23b). Pour les deux types de fibre (2) et (3), les comportements de réponse en contrainte-déformation sont similaires pour les deux méthodes de fabrication (Figure 2.24a et Figure 2.25a).



**Figure 2.23:** Essais de compression triaxiale effectués sur des éprouvettes renforcées avec le type de fibre (1) et préparées avec les techniques MT et MV: (a) réponse de contrainte déportée déviatorique et (b) réponse de contrainte déformée volumétrique (Ibraim et al. 2012).



**Figure 2.24:** Essais de compression triaxiale effectués sur des éprouvettes renforcées avec des fibres de type (2) et préparées avec les techniques MT et MV (Ibraim et al. 2012).



**Figure 2.25:** Essais de compression triaxiale effectués sur des éprouvettes renforcées avec des fibres de type (3) et préparées avec les techniques MT et MV (Ibraim et al. 2012).

En conclusion, la présence de fibres génère un comportement plus dilatant dans les deux méthodes (compactage humide) et MV (par vibration du sable humide). Cependant les résultats expérimentaux indiquent que les réponses mécaniques des échantillons renforcés préparés avec les deux procédés de fabrication (MT et MV) sont relativement similaires.

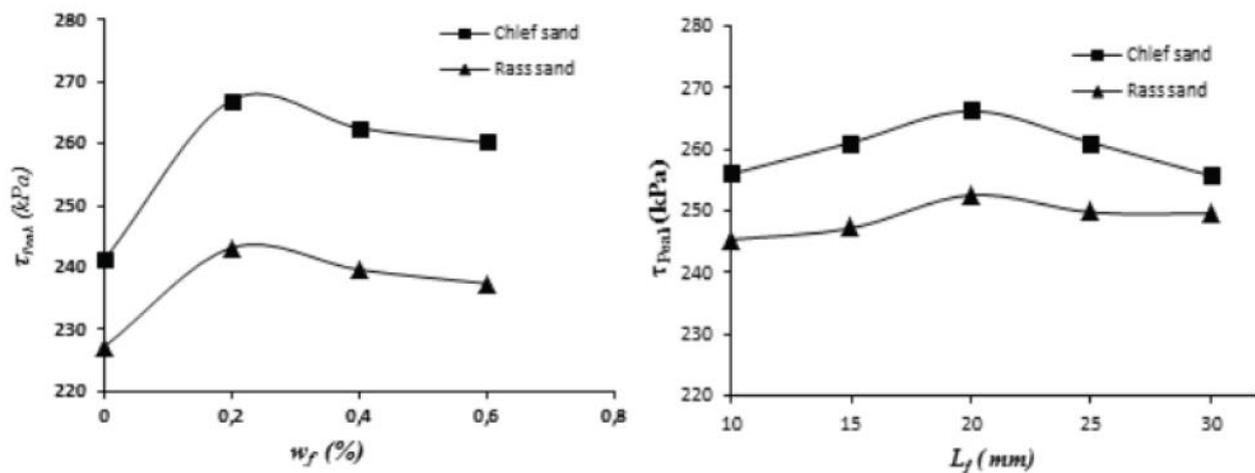
## 2.5. Incidence des fibres sur le comportement des sols renforcés

### 2.5.1. Résistance au cisaillement

Un certain nombre d'essais triaxiaux conventionnels, de compression non confinés et de cisaillement direct sur le sujet de l'incidence des fibres sur la résistance au cisaillement ont été

menés par plusieurs chercheurs au cours des dernières décennies. Leurs recherches ont démontré que la résistance au cisaillement est accrue et que la perte de résistance après la pointe est réduite lorsque des fibres discrètes sont mélangées avec le sol (Gray et Al-Refeai, 1986; Freitag, 1986; Ranjan et al. 1996; Consoli et al. 1998; Ibraim et Fourmont, 2006). Des essais de compression triaxiale drainée sur du sable renforcé de fibres entrepris par Michalowski et Cermak (2003) indiquent une augmentation substantielle de la résistance au cisaillement des sols lorsqu'ils sont mélangés à des fibres de renforcement. Cette augmentation peut atteindre jusqu'à environ 20% lorsque la concentration en fibres est de 0.5% (en volume) comparée à celle du sable non renforcé, et jusqu'à 70% pour une concentration en fibres de 2%.

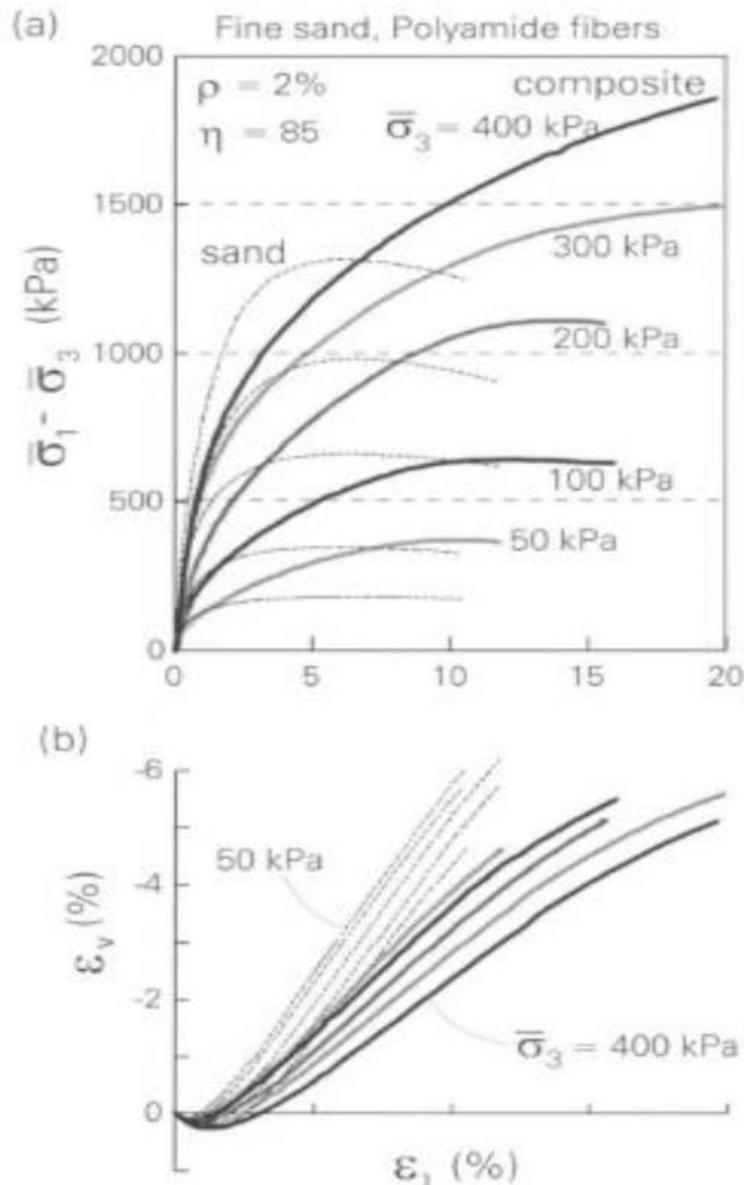
Une étude a été menée par Bouaricha et al. (2017) afin d'étudier les paramètres de résistance au cisaillement de deux types de sables (Chlef et Oued Rass) traités par clinker et renforcés avec des fibres de verre à répartition aléatoire avec différents teneurs ( $w_f = 0\%$ , 0.2%, 0.4% et 0.6%) et différentes longueurs ( $L_f = 10, 15, 20, 25$  et 30 mm) de fibres en effectuant des tests de cisaillement direct. La figure 2.26 montre clairement que l'inclusion du renforcement augmente la résistance maximale au cisaillement par rapport à celle d'un sol non renforcé et que la valeur critique du contenu en fibres est de 0.2% pour des fibres de longueur  $L_f = 15$  mm et que l'ajout de fibres de 20 mm pour un contenu en fibres de  $w_f = 0.2\%$  donne une résistance au cisaillement maximale nettement plus élevée pour les deux types de sables.



**Figure 2.26:** Variations de la résistance au cisaillement des sable de Chlef et de Rass renforcés en fonction de (a) les teneurs en fibres et (b) la longueur des fibres (Bouaricha et al. 2017).

### 2.5.2. Rigidité

La rigidité initiale du composite sol-fibres est affectée par les caractéristiques des fibres (rigidité et rugosité). Michalowski et Cermak (2003) ont observé qu'une faible concentration de fibres d'acier ( $\rho = 0.5\%$ ) n'a pas d'effet négatif sur la rigidité initiale du composite. Des essais antérieurs avec des fibres d'acier et du sable grossier ont indiqué qu'une concentration plus élevée (1.25%) n'avait pas non plus d'effet négatif sur la rigidité initiale (Michalowski et Zhao, 1996). Cependant, une augmentation de la teneur en fibres de polyamide à 2% entraîne une diminution sensible de la rigidité initiale (Figure 2.27).

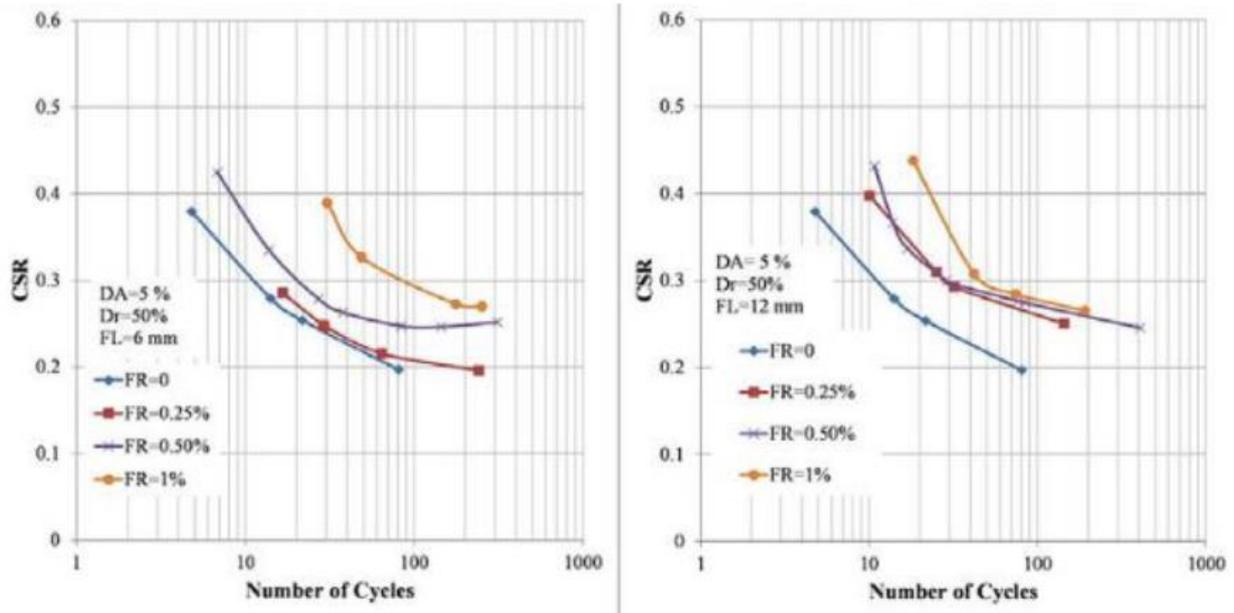


**Figure 2.27:** Compression triaxiale; sable fin, fibres de polyamide,  $\rho = 2,0\%$ ,  $\eta = 85$ ,  $l = 25,4$  mm: (a) courbes de contrainte-déformation; (b) contrainte volumétrique (Michalowski et Zhao, 1996).

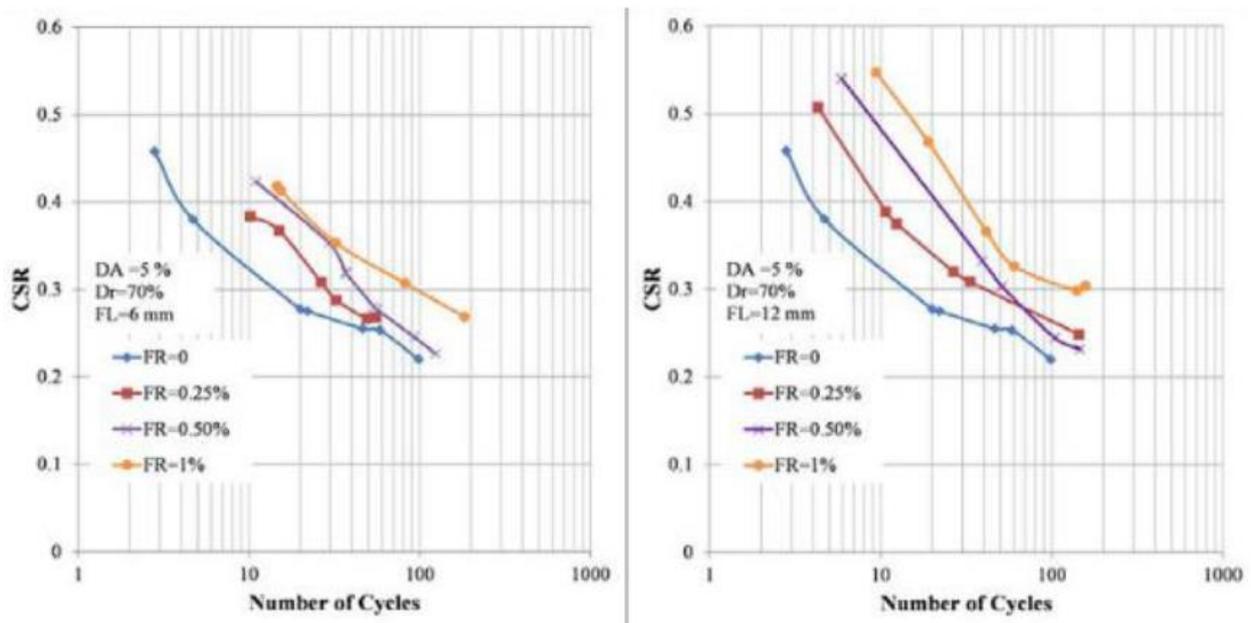
Cette perte de rigidité initiale est probablement due aux changements dans le tissu du sable produits par les fibres synthétiques (flexibles). Les fibres sont susceptibles de provoquer une distribution de porosité non homogène puisque les inclusions longues empêchent les grains d'être tassés. Par conséquent, les poches de matrice éloignées des fibres ont une porosité considérablement plus faible que le sable au voisinage immédiat des fibres. Pendant le chargement hydrostatique, les fibres sont soumises à la compression et à la flexion, mais une fois que le cisaillement commence, les fibres sous tension subissent un étirement progressif tandis que celles sous compression se contractent. En conséquence, la rigidité dans l'étape initiale de chargement est inférieure à celle pour un sable de porosité moyenne comparable sans fibres. Cet effet était très net lorsque de grandes concentrations de fibres synthétiques (flexibles) étaient utilisées. Comme les fibres d'acier ne se sont pas pliées ou tordues (dans la gamme des contraintes testées), la réduction de la rigidité n'a pas été détectée dans le sable renforcé avec des fibres d'acier. Les mêmes observations ont été faites par Claria et al. (2016) qui ont trouvé que la rigidité diminue avec la teneur en fibres de polypropylène mais augmente avec la pression de confinement.

### **2.5.3. Résistance à la liquéfaction**

Une série d'essais triaxiaux cycliques consolidés drainés a été conduite par Eskisar et al. (2016) pour étudier le comportement à la liquéfaction et le développement de la pression interstitielle dans des échantillons de sable renforcés par fibres. Les effets de la teneur en fibres de (0.25%, 0.50% et 1%), de la longueur des fibres de (6 mm et 12 mm) et de la densité relative (50% et 70%) ont été examinés pour déterminer les relations entre le rapport de contrainte de cisaillement cyclique et le nombre des cycles de chargement. La figure 2.28 illustre le comportement à la liquéfaction d'un échantillon de sable renforcé de fibres (Eskisar et al. 2016). On peut constater à travers cette figure que quelle que soit la longueur de la fibre, des valeurs de CSR les plus élevées pourraient être obtenues pour un rapport de fibres de 1% dans des échantillons préparés à une densité relative de  $D_r = 50\%$ . 20 cycles de chargement des échantillons sans fibres ont donné une valeur de CSR de 0.26, tandis que des échantillons avec une teneur en fibres de 1% et de longueur de 6 mm ont donné un CSR de 0.40 et des échantillons avec une teneur en fibres de 1% et de longueur de 12 mm ont donné un CSR de 0.45. Cette découverte présente également la contribution de la longueur des fibres, où les plus longues ont augmenté la résistance à la liquéfaction des sols sableux. Dans la figure 2.29, les relations entre le CSR et le nombre de cycles sont données pour des échantillons préparés à une densité relative de 70%. Les tests ont montré que les échantillons sans fibres pouvaient facilement se liquéfier sans nécessiter autant de cycles de chargement que les échantillons renforcés.



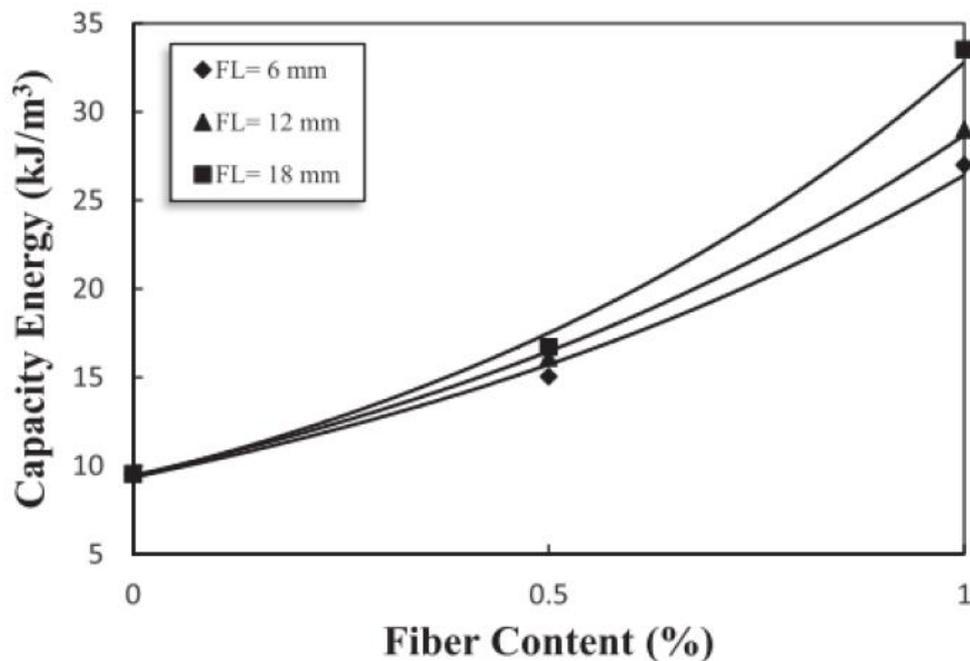
**Figure 2.28:** variation du CSR avec le nombre de cycles en considérant l'effet de la longueur de fibre  $L_f = 6$  mm et  $L_f = 12$  mm, respectivement ( $D_r = 50\%$  et  $\sigma'_0 = 100$  kPa) (Eskisar et al. 2016).



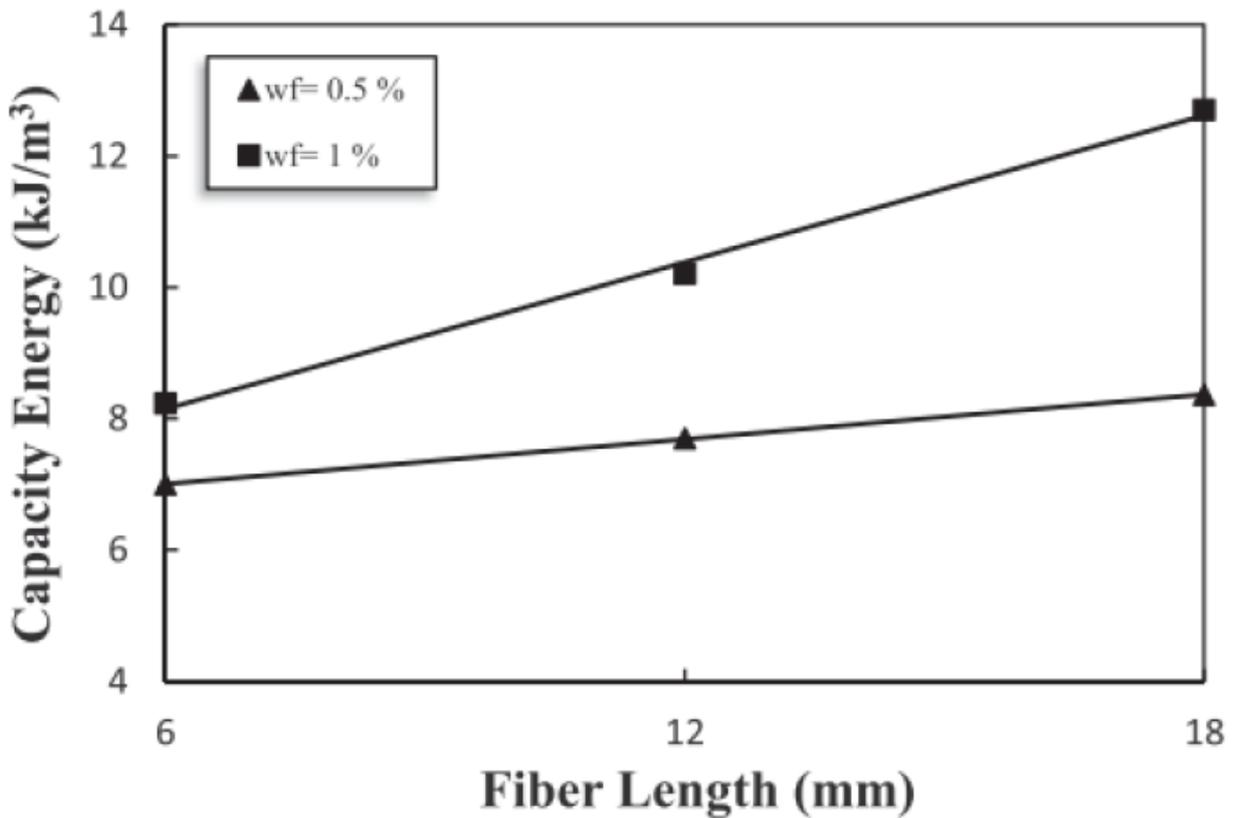
**Figure 2.29:** variation du CSR avec le nombre de cycles en considérant l'effet de la longueur de fibre  $L_f = 6$  mm et  $L_f = 12$  mm, respectivement ( $D_r = 70\%$  et  $\sigma'_0 = 100$  kPa) (Eskisar et al. 2016).

Des études ont montré que l'énergie dissipée totale cumulée nécessaire pour provoquer la liquéfaction ( $W_{liq}$ ) est un excellent indice pour évaluer le potentiel de liquéfaction. En conséquence, plusieurs recherches ont été menées pour étudier ce paramètre (par exemple, liang 1995; Baziar et al. 2007). Dans ce contexte, Amini et al. (2018) ont entrepris une série d'essais triaxiaux cycliques

destinés à étudier les caractéristiques de liquéfaction du sable de Babolsar renforcé par des fibres distribuées de manière aléatoire en utilisant une approche à base d'énergie. L'énergie de capacité est définie comme l'énergie dissipée cumulative au début de la liquéfaction. Les résultats du test ont montré que  $W_{liq}$  était significativement affecté par l'inclusion de la fibre. L'addition de fibres a considérablement augmenté la résistance à la liquéfaction du sable de Babolsar. En effet, le nombre de cycles de liquéfaction a augmenté en raison de l'inclusion de fibres; cela signifie que l'énergie dissipée cumulée pour le sable renforcé était plus grande que pour celle du sable non renforcé. La figure 2.30 et 2.31 montrent la variation de l'énergie de capacité par rapport à la teneur en fibre  $w_f$  et de la longueur de fibre  $L_f$ , respectivement. Le niveau de dissipation d'énergie requis pour la liquéfaction augmentait lorsque le sable était renforcé de fibres. Les résultats montrent que  $W_{liq}$  a augmenté linéairement avec  $L_f$  et de manière non linéaire avec  $w_f$ . L'augmentation maximale de la capacité énergétique du sable de Babolsar était de 250% à une teneur en fibre  $w_f = 1\%$  en poids humide et une longueur  $L_f = 18$  mm pour une pression de confinement de 200 kPa et une densité relative  $D_r = 40\%$ . Il a été démontré que l'effet de la fibre sur l'augmentation de l'énergie requise pour la défaillance était significatif; Cependant, l'effet de  $L_f$  était inférieur à celui de  $w_f$ . Des observations similaires ont été rapportées par Consoli et al. (2002) et Babu et Vasudevan(2008) pour du sable renforcé de fibres de coco et de PET (polyéthylène téréphtalate), respectivement, dans des conditions statiques. Ils ont constaté que la capacité d'absorption d'énergie du sable augmentait avec l'inclusion de fibres.



**Figure 2.30:** Énergie de capacité en fonction de la teneur en fibres pour différentes longueurs de fibres (CP = 200 kPa et  $D_r = 40\%$ ) (Amini et al. 2018).



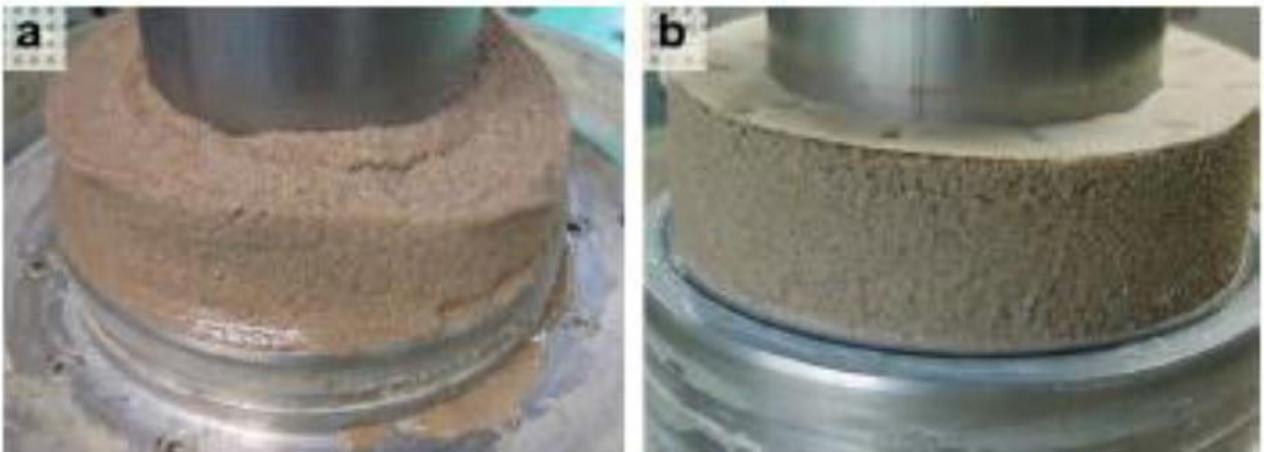
**Figure 2.31:** Énergie de capacité en fonction de la longueur des fibres pour différents teneurs en fibres ( $CP = 50 \text{ kPa}$  et  $D_r = 40\%$ ) (Amini et al. 2018).

#### 2.5.4. Stabilité structurelle

Diambra et al. (2010) ont constaté dans leurs travaux que la liquéfaction complète de l'échantillon est possible pour les spécimens renforcés et non renforcés (en appliquant une inversion de contrainte soudaine de  $90^\circ$  des axes de déformation principaux) à la fin du chargement monotone. Il semble que la présence de fibres peut limiter ou même empêcher l'apparition de l'étalement latéral du sol normalement observé pour les échantillons non renforcés. Liu et al. (2011) ont constaté lors d'essais par appareil de cisaillement à anneaux que les échantillons non armés (lâches, moyennement denses) ont montré clairement une structure complètement affaissée, tandis que les échantillons renforcés maintenaient la stabilité structurelle même après le retrait de la bague supérieure (Figure 2.32 et 2.33). Il semble que la présence de fibres puisse limiter ou même empêcher la dissémination latérale du sol qui est l'une des conséquences de la liquéfaction. Ce phénomène dans des essais triaxiaux non drainés sur sable saturé a également été présenté par Ibraim et al. (2010).

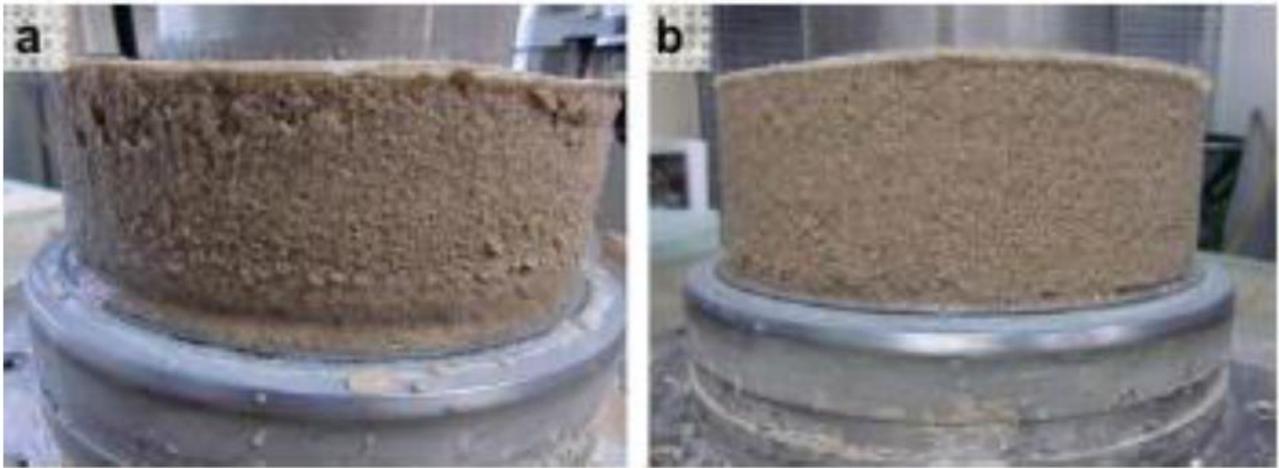


**Figure 2.32:** Deux photos des échantillons lâches entièrement liquéfiés après cisaillement:  
 (a)Sable; (b) sable + 0.4% de fibres (Jin Liu et al. 2011).



**Figure 2.33 :** Deux photos des échantillons moyennement denses entièrement liquéfiés après cisaillement: (a) Sable; (b) Sable + 0.4% de fibres (Jin Liu et al. 2011).

Cependant les deux échantillons à haute densité entièrement liquéfiés non renforcés et renforcés avec 0.4% de fibres ont tous deux montré une bonne stabilité structurelle. Il semble que la densification et le renforcement des fibres puissent tous deux limiter ou même empêcher la propagation latérale du sol due à la liquéfaction statique (Figure 2.34).



**Figure 2.34:** Deux photos des échantillons denses entièrement liquéfiés après cisaillement:  
(a) Sable; (b) Sable + 0.4% de fibres (Jin Liu et al. 2011).

## 2.6. Conclusion

Le présent chapitre est composé de deux parties: la première partie traite l'amélioration des sols par l'inclusion des fibres, une technique de plus en plus utilisée par rapport à d'autres méthodes d'amélioration. Cette méthode est économique, elle ne nécessite pas en effet de moyens particuliers pour la mise en place et pourrait être appliquée à plusieurs types de sols.

La deuxième partie comporte les différents paramètres qui influent sur le mécanisme de renforcement par fibre et leur incidence sur le comportement du sol renforcé. Selon les résultats des différents travaux de recherche menés, les fibres peuvent améliorer la résistance au cisaillement et les caractéristiques mécaniques des sols sableux. Cette amélioration dépend de plusieurs paramètres liés aux caractéristiques du renforcement et au sol.

Dans le prochain chapitre, nous présentons une description des matériaux utilisés dans le cadre de ce mémoire. Ainsi que le dispositif expérimental et le mode opératoire des différents essais réalisés.

***Chapitre 3:***  
***Dispositif expérimental, caractéristiques des matériaux  
utilisés et mode opératoire***

### **3.1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons le dispositif expérimental et le mode opératoire utilisé au laboratoire pour exécuter les séries d'essais et analyser le comportement du sable sans et avec l'ajout du renforcement. Après avoir présenté les appareils utilisés, nous allons définir les étapes principales pour réaliser un essai. Ensuite nous présentons les différentes étapes du mode opératoire d'un essai de cisaillement à la boîte de cisaillement. La méthode de préparation des échantillons du sable renforcés et non renforcés à tester prend une part prépondérante dans ce chapitre, du fait que c'est un paramètre très important pour la bonne reproduction de l'état initial du sol sans oublier les caractéristiques des matériaux utilisés.

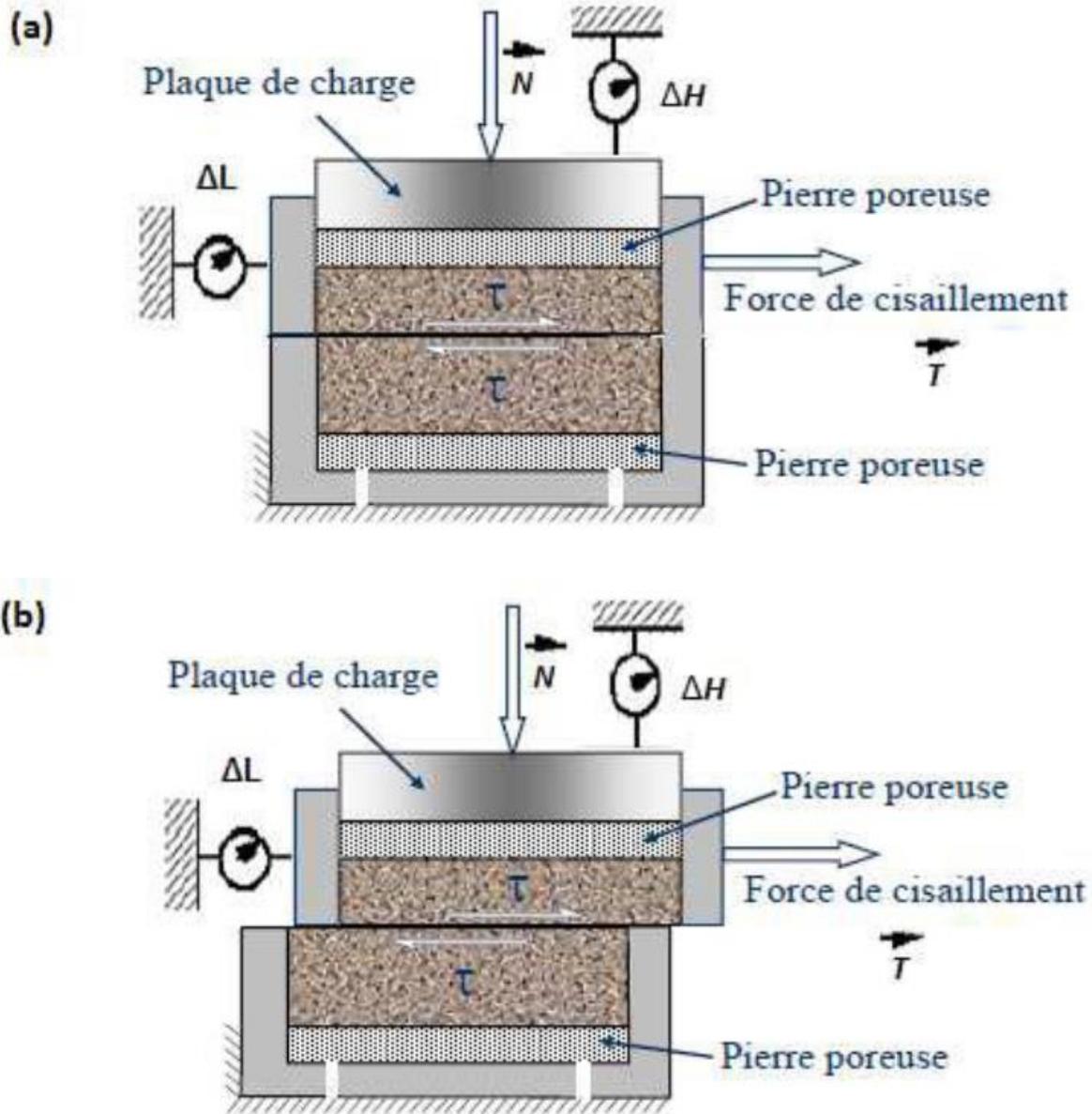
### **3.2. Dispositif expérimental**

Deux types de dispositifs expérimentaux ont été utilisés dans cette étude. Une boîte de cisaillement direct utilisé pour l'étude du comportement mécanique.

#### **3.2.1. Essai a la boîte de cisaillement**

##### **3.2.1.1. Principe de l'essai**

La boîte utilisée est une boîte carrée de 60 x 60 mm contenant deux demi-boîtes (Figure 3.1). La hauteur initiale est égale à 25 mm. L'essai consiste à placer l'échantillon dans la boîte et puis de le soumettre à une charge verticale  $N$  normale au plan de cisaillement, appliquée sur la partie supérieure de l'échantillon et maintenue constante pendant tout l'essai représentant la contrainte normale ( $\sigma_n = 50, 100$  et  $200$  kPa) appliquée à l'aide de masses. Après consolidation, une force transversale  $T$  est appliquée sur l'une des demi-boîtes à l'aide d'un moteur, la demi-boîte coulisse sur l'autre à vitesse constante ( $V= 1$  mm/min) dans un mouvement dans la direction de leur plan de séparation jusqu'à la fin de l'essai avec un déplacement relatif  $\Delta L$ . L'effort horizontal  $T$  qu'il est nécessaire d'appliquer pour produire ce déplacement est mesuré en fonction de  $\Delta L$ .



**Figure 3.1:** Principe de l'essai de cisaillement rectiligne à la boîte :

(a) En début de cisaillement, (b) En cours de cisaillement.

La valeur de  $T$  correspondant à la rupture de l'échantillon permet en répétant l'essai pour plusieurs valeurs de  $N$  d'accéder aux paramètres de résistance au cisaillement du sol ( $C$  et  $\phi$ ).

En effet, la charge  $N$  rapportée à la section  $A$  de l'échantillon représente la contrainte normale moyenne sur le plan de rupture  $\sigma_n$  (kPa), et l'effort de cisaillement  $T$  rapporté à la section  $A$  représente la contrainte de cisaillement moyenne  $t$  sur ce même plan  $\tau$  (kPa).

### 3.2.1.2. Appareillage

La boîte de Casagrande qui permet d'appliquer et de mesurer les déplacements et les efforts sur l'échantillon est représentée sur la figure 3.2 et 3.3. La boîte de section carrée est déposée dans un chariot qui peut être entraîné en translation à l'aide d'un moteur dont la vitesse est paramétrable. Le bâti est surmonté d'un étrier recevant les poids actionnant un système de bras de levier qui va fournir la charge  $N$ .

Le dispositif est constitué comme suit:

- **Pierres poreuses:** Elles permettent de drainer l'échantillon et assurent une bonne adhérence entre l'échantillon et les deux demi-boîtes.
- **Demi-boîte supérieure:** Formée d'un cadre et d'un piston, elle permet de respecter la charge verticale  $N$  sur l'échantillon seulement.
- **Demi-boîte inférieure:** Elle est fixe et sert de moule.
- **Dispositif à contrainte contrôlée:** IL entraîne la demi-boîte inférieure à vitesse constante.
- **Comparateurs ou capteurs électroniques:** Mesurent les déplacements horizontaux  $\Delta L$  et verticaux  $\Delta H$ .

**Anneau dynamométrique:** Il mesure l'effort horizontal  $T$ .

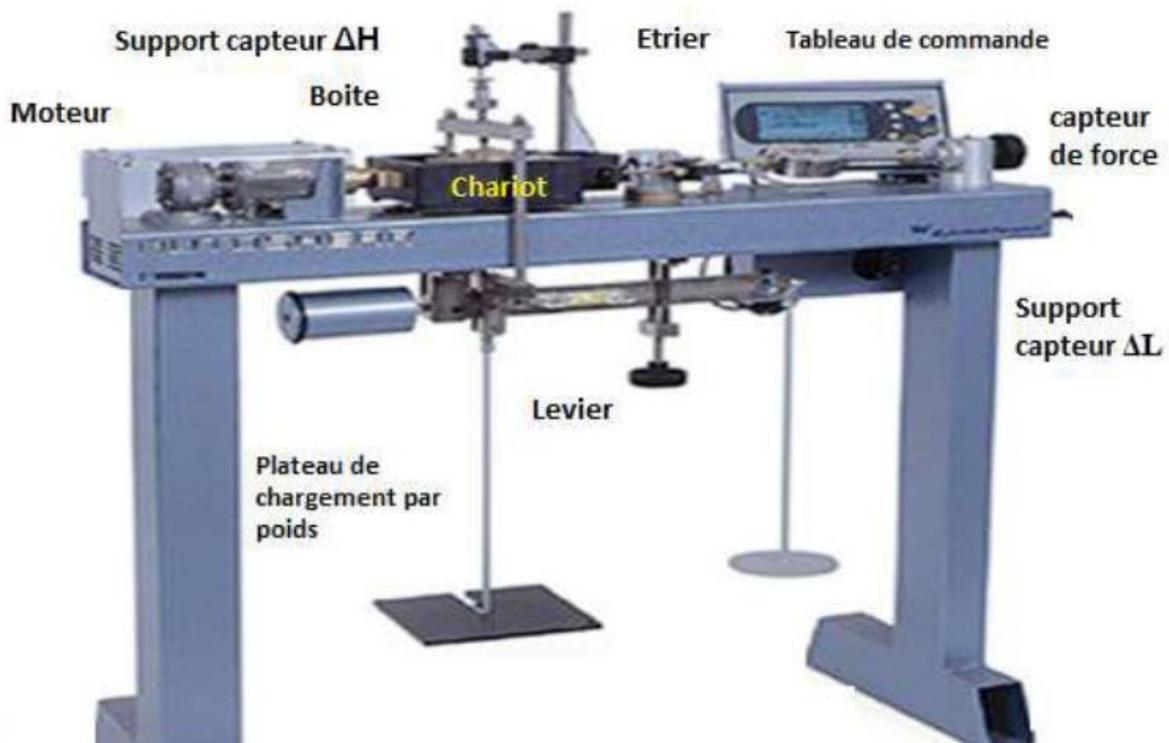


Figure 3.2: Bâti de cisaillement.

Tous les tests ont été réalisés au Laboratoire de Science des Matériaux et Environnement (LMSE) de l'Université Hassiba Benbouali de Chlef (Figure 3.3).



**Figure 3.3:** Boîte de cisaillement direct utilisée

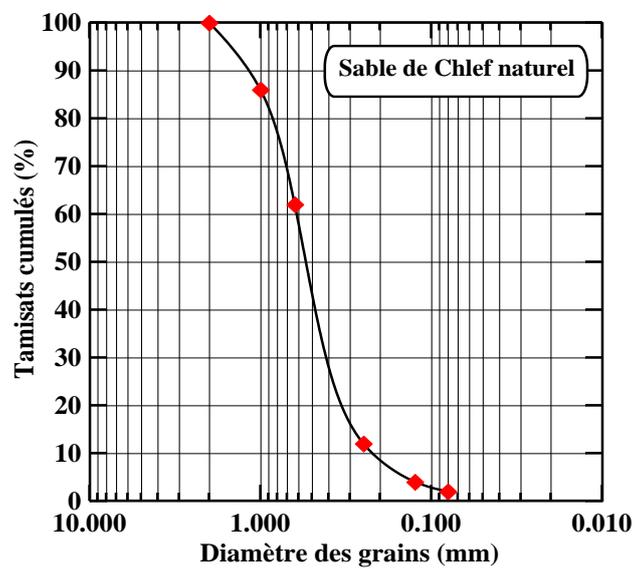
### 3.3. Matériaux utilisés

#### 3.3.1. Sol

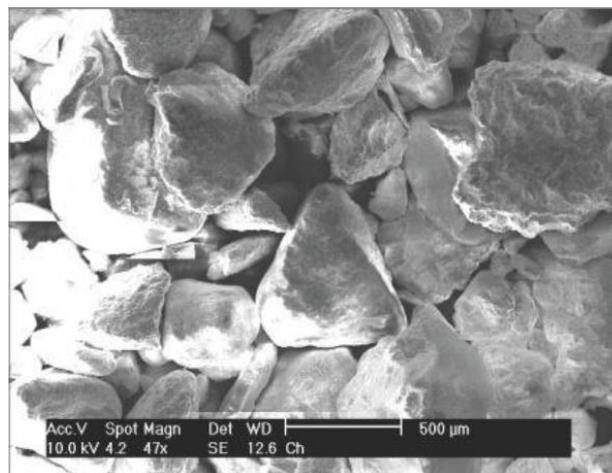
Le sable utilisé dans le présent travail est un sable naturel de Chlef (Figure 3.4). Les échantillons de ce sable ont été prélevés des berges de l'Oued Chlef dans la région qui porte le même nom située à l'ouest d'Alger et qui a connu l'apparition du phénomène de liquéfaction durant les deux derniers grands séismes de 1954 et 1980. C'est un sable moyen avec des particules arrondies et un diamètre moyen  $D_{50} = 0.55$  mm, avec une teneur de 3% de fines peu plastiques ( $I_p = 5.5\%$ ), la figure 3.5 présente la courbe granulométrique du sable. Les caractéristiques du sable et des fines sont illustrées dans le tableau 3.1. La figure 3.6 montre la vue microscopique du sol de Chlef.



**Figure 3.4:** Sable naturel d'Oued Chlef



**Figure 3.5:** Courbe granulométrique du sable naturel de Chlef.



**Figure 3.6:** Vue microscopique des particules du sol de Chlef.

**Tableau 3.1:** Caractéristiques physiques du sable naturel de Chlef.

Propriétés du sable	Spécifications d'essai standard	Valeur
Diamètre moyen, $D_{50}$ (mm)	ASTMD-422	0.55
Diamètre maximum, $D_{max}$ (mm)	ASTMD-422	2.00
Coefficient d'uniformité, $C_u$ (.)	ASTMD-422	2.40
Coefficient de courbure, $C_c$ (.)	ASTMD854-02	0.891
Poids volumique ds grains solides, $\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	ASTMD4253-00	2.665
Indice des vides maximal, $e_{max}$ (.)	ASTMD4254-00	0.854
Indice des vides minimal, $e_{min}$ (.)	ASTMD4254-00	0.535
Forme des grains	Arrondie	-

### 3.3.2. Matériaux de renforcement

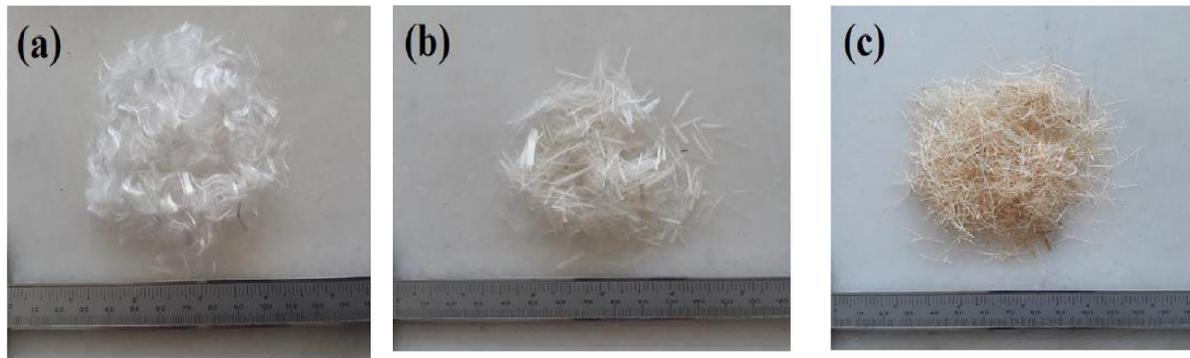
Des fibres de Polypropylène, de verre et de chanvre de longueur similaire ( $L_f = 12$  mm) et de teneurs en fibres différentes ( $F_c = 0\%$ ,  $0,25\%$ ,  $0,5\%$ ,  $0,75\%$  et  $1\%$ ) en poids de sol sec ont été utilisées dans ce travail (Figure 3.7).

- La fibre de polypropylène est l'inclusion la plus largement utilisée dans les essais en laboratoire du renforcement de sol (Santoni et al. 2001 ; Yetimoglu et al. 2003 ; Khattak et al. 2006 ; Tang et al. 2007). Actuellement, les fibres PP sont utilisées pour améliorer les propriétés de résistance du sol, pour réduire les propriétés de retrait et pour surmonter les propriétés chimiques et la dégradation biologique (Musenda 1999; Puppala et al. 2000; Vasudev 2007).

- Les fibres de verre est l'une des fibres les plus répandues par son utilisation dans l'ingénierie géotechnique. La fibre de verre est non bio dégradable et très performante dans le renforcement des sols (Maher et Gray, 1990; Al- Refaei, 1991; Consoli et al. 1998; Mujah et al. 2013; Benessaleh et al. 2015; Bouaricha et al. 2019).

- Les fibres de chanvre sont des fibres lingo-cellulosées naturelles et écologiques à haute résistance à la traction utilisée traditionnellement comme renfort pour les plaques de plâtre de gypse dans l'industrie du bâtiment. Cette fibre a fait l'objet de nombreuses recherches dans le domaine du renforcement de sol (Ghavami et al. 1999; Prabakar and Siridihar 2002; Mattone 2005).

Les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres sont présentées dans le tableau 3.2.



**Figure 3.7:** Vues des fibres utilisés: (a) fibre de Polypropylène, (b) fibre de verre, (c) fibre de chanvre.

**Tableau 3.2:** Propriétés physiques et mécaniques des fibres utilisées

Type de fibre	Densité spécifique	Longueur (mm)	Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)
Verre	2.62	12	18	485	73
Polypropylène	0.91	12	25	700	14
Chanvre	0.96	12	35	550	19

### 3.3.3. Détermination de la masse du sol

L'essai consiste à mettre en place une masse connue pour un volume connu, pour la précision du résultat, la masse calculée doit correspondre au volume de l'échantillon. La mesure de la masse est déterminée par les formules suivantes:

$$I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (3.1)$$

Ce qui donne:

$$e = e_{\max} - I_d(e_{\max} - e_{\min}) \quad (3.2)$$

L'indice des vides "e" est donné par la formule suivante:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1 \quad (3.3)$$

Et le poids spécifique " $\gamma_s$ " sec est défini par:

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s} \quad (3.4)$$

De (3.4), (3.3) et (3.2), on obtient:

$$P_s = \frac{V \cdot \gamma_s}{1 + e_{\max} - I_d \cdot (e_{\max} - e_{\min})} \quad (3.5)$$

### 3.3.4. Préparation des échantillons

Des échantillons de sable non renforcés et renforcés reconstitués en laboratoire avec des fibres de polypropylène, de verre et de sisal ont été utilisés dans cette étude. La préparation des échantillons a été effectuée en déterminant d'abord le poids requis de sable et de fibres pour le mélange. La teneur en fibres ( $F_c$ ) incluses dans un composite (sable + fibre) est définie en pourcentage de poids sec de sable:

$$F_c(\%) = 100x \frac{W_f}{W_s} \quad (3.6)$$

Où  $W_f$  et  $W_s$  représentent respectivement le poids des fibres et du sable sec. Le sable séché au four puis tamisé à 2 mm a été ajouté et mélangé avec des fibres (Figure 3.8).



**Figure 3.8:** Mélange de sable et de fibres: (a) fibres de polypropylène; (b) fibres de verre; (c) fibres de chanvre.

Dans cette étude, un nombre d'essais de quarante cinq (45) à la boîte de cisaillement direct a été réalisé sur du sable renforcé avec différentes teneurs en fibres de 0.25, 0.5, 0.75 et 1% en masse de sol sec, en utilisant la méthode du dépôt sec comme méthode de préparation afin d'étudier le comportement mécanique d'un sable renforcé par fibre distribué aléatoirement. Une série d'essais sur des échantillons non renforcés a également été accomplie pour fournir une base de comparaison et évaluer l'effet du renforcement sur le comportement du sol. Les essais ont été réalisés sur des échantillons de sable soumis à trois contraintes normales de 50, 100 et 200 kPa et préparés à deux densités relatives initiales de 50 et 80% représentant respectivement des états moyennement dense et dense. L'état du sol meuble n'a pas été inclus dans cette étude car la majorité des sols traités par

fibres sont généralement damés ou compactés (Benessalah et al. 2015). Les mélanges composites (sable + fibres) sont illustrés dans la figure 3.9.



**Figure 3.9:** Échantillons renforcés par fibres: (a) fibres de polypropylène; (b) fibres de verre; (c) fibres de chanvre

### 3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les matériaux et le dispositif expérimental utilisé dans ce travail. Tout d'abord il a été décrit l'appareil de la boîte de cisaillement direct de Casagrande et les étapes contenues dans la procédure d'exécution des essais de cisaillement suivis de la méthode de préparation des échantillons, ensuite, il a été exposé les caractéristiques physiques du sol et du renforcement étudié.

Dans le prochain chapitre, nous allons présenter le travail expérimental réalisé dans le cadre de ce mémoire, avec l'utilisation d'un renforcement par fibres pour l'amélioration du comportement mécanique et des performances à la liquéfaction des sables.

***Chapitre 4:***  
***Comportement mécanique des sols renforcés par des***  
***fibres***

## 4.1. Introduction

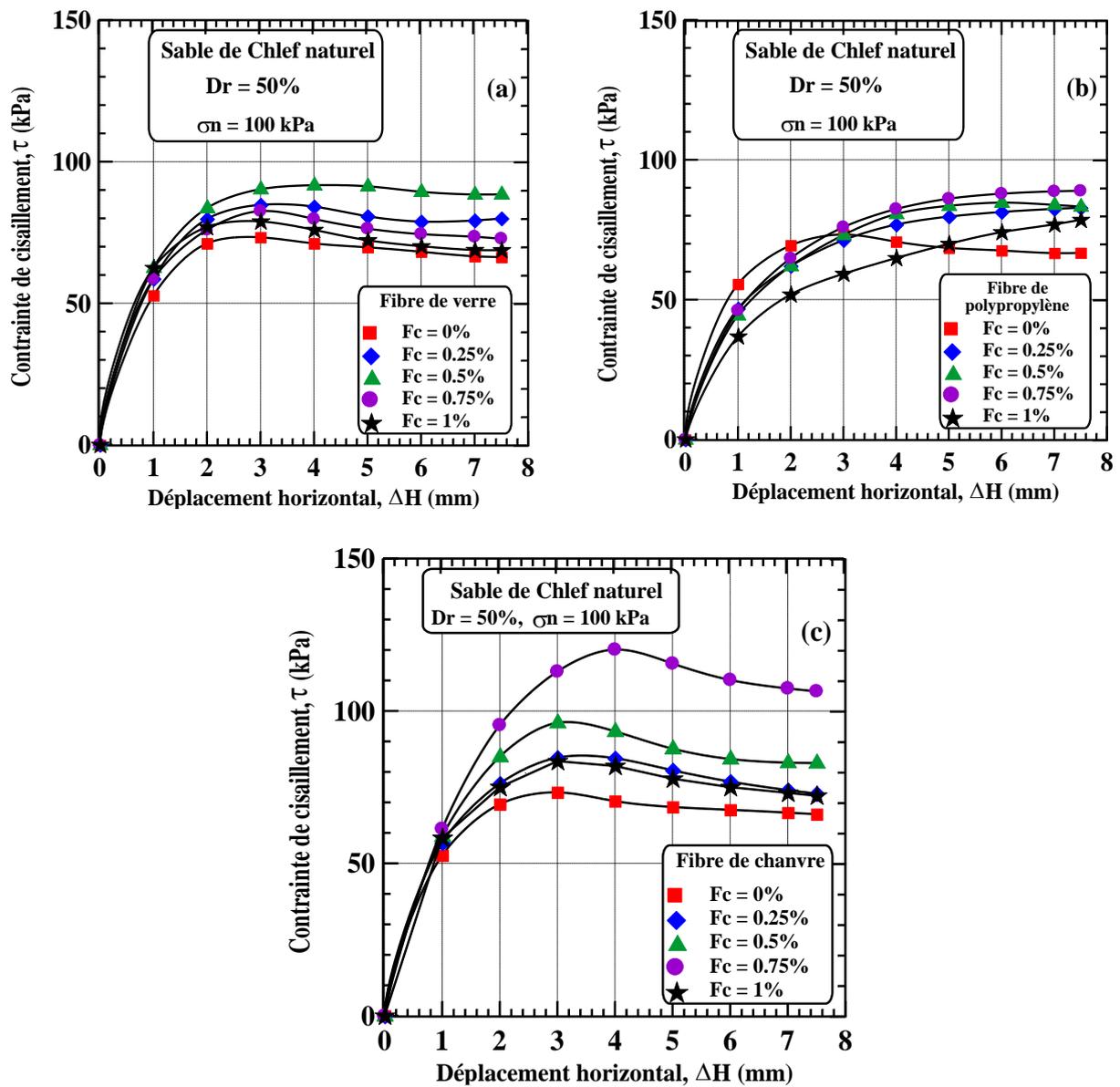
Ce chapitre présente les résultats d'essais effectués à la boîte de cisaillement direct sur le sable naturel d'oued Chlef renforcé par différents types de fibres naturelles et synthétiques distribuées aléatoirement avec deux densités relatives: un état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ) et un état dense ( $D_r = 80\%$ ). Celles-ci seront soumises à trois contraintes normales de  $\sigma_n = 50, 100$  et  $200$  kPa.

Ces essais ont été effectués dans le but de mettre en évidence l'influence de la teneur en fibre ( $F_c$ ), du type de fibre, de la contrainte normale appliquée ( $\sigma_n$ ) et de la densité relative ( $D_r$ ) sur la réponse mécanique du sable renforcé par fibre.

## 4.2. Contrainte de cisaillement

### 4.2.1. Etat moyennement dense ( $D_r = 50\%$ )

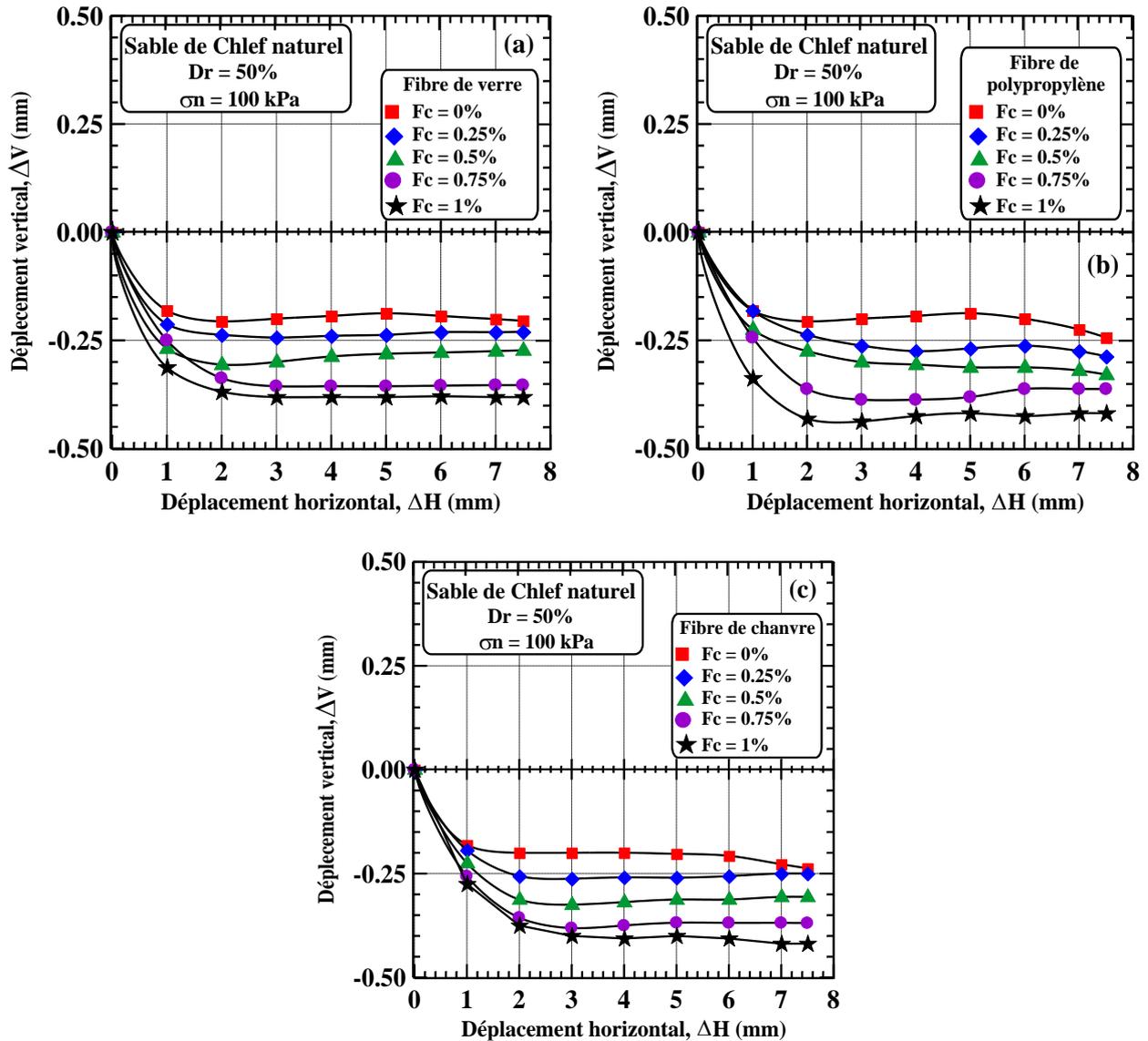
La figure 4.1a 4.1b et 4.1c montrent l'évolution de la résistance au cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) réalisés sur des échantillons non renforcés et renforcés par différentes types de fibre sous une contrainte normale constante  $\sigma_n = 100$  kPa et une densité relative moyenne  $D_r = 50\%$ . Il ressort de la figure 4.1 que la résistance du sable caractérisée par la contrainte de cisaillement augmente d'une manière significative avec l'augmentation de la teneur en fibre jusqu'à un teneur optimale propre à chaque type de fibre sous une contrainte normale constante pour les trois types de fibres étudiées. Les valeurs de la résistance au cisaillement maximal obtenues pour des échantillons renforcés par fibre de verre et soumis à une contrainte normale constante de  $100$  kPa pour des teneurs en fibre ( $F_c = 0\%, 0.25\%, 0.5\%, 0.75\%$  et  $1\%$ ), ont enregistré les valeurs suivantes:  $\tau_{max} = 73.3, 84.78, 91.72, 82.58$  et  $78.94$  kPa, respectivement (Figure 4.1a). En ce qui concerne les échantillons renforcés par fibre de polypropylène et ceux renforcés par fibre de chanvre, la figure 4.1b et 4.1c, se caractérisent par les mêmes observations que celles mentionnées dans la figure 4.1a de la résistance au cisaillement réalisée sur des échantillons renforcés par fibre de verres. Pour les mêmes teneurs en fibres, les valeurs de la résistance au cisaillement maximal obtenues pour des échantillons renforcés par fibres de polypropylène ont enregistré les valeurs suivantes:  $\tau_{max} = 73.3, 82.86, 84.72, 88.92$  et  $78.56$  kPa. Quant à ceux renforcés par fibre de chanvre, les valeurs enregistrées sont les suivantes:  $\tau_{max} = 73.3, 84.52, 96.14, 120.17$  et  $83.53$  kPa. On en déduit des valeurs enregistrées que les échantillons renforcés par fibres de chanvre paraissent plus rigides que ceux renforcés par fibres de verre ou fibres de polypropylène du fait de l'écart de résistance élevée entre les trois types de fibres utilisées.



**Figure 4.1:** Evolution de la résistance au cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) réalisés sur des échantillons non renforcés et renforcés par différents types de fibre sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$  kPa) et une densité relative moyenne ( $D_r = 50\%$ ). (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.

Les variations de la déformation volumique ( $\Delta V$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) des échantillons non renforcés et renforcés sont présentées dans la figure 4.2a, 4.2b et 4.2c pour des fibres de verres, de polypropylène et de chanvre, respectivement. Il ressort de ces figures que les comportements des sols composites montrent une certaine rigidification lorsqu'il est introduit des fibres dans la masse du sol. En effet, il a été observé que l'introduction d'inclusions en fibres limite la dilatance du sol. Il a été également noté qu'une augmentation de la teneur en fibres accentue le comportement contractif des sols renforcés par fibres pour chaque type de fibres étudié. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Khebizi et al. (2018). Ce comportement contractif est

probablement dû au chevauchement et l'enroulement des fibres durant le cisaillement du sol renforcé. Ces enroulements créent des agglomérats de fibres limitant ainsi la liaison entre les particules du sol augmentant par conséquent la contractance des sols renforcés par fibres distribuées aléatoirement.

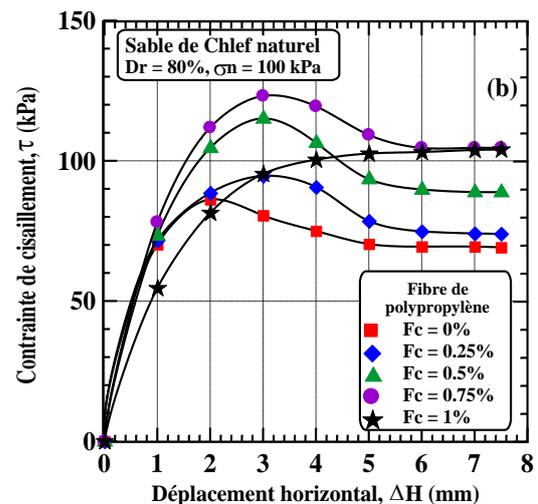
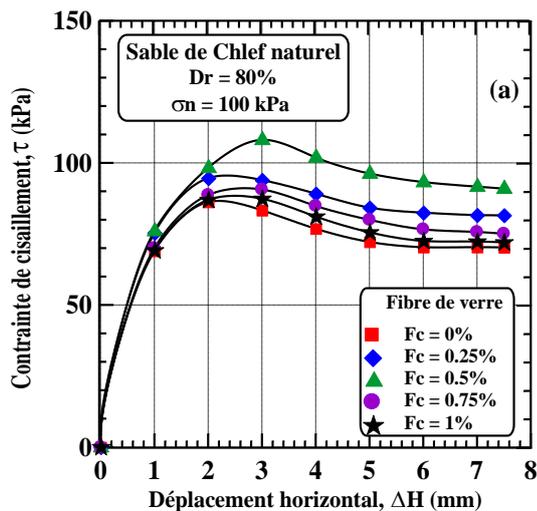


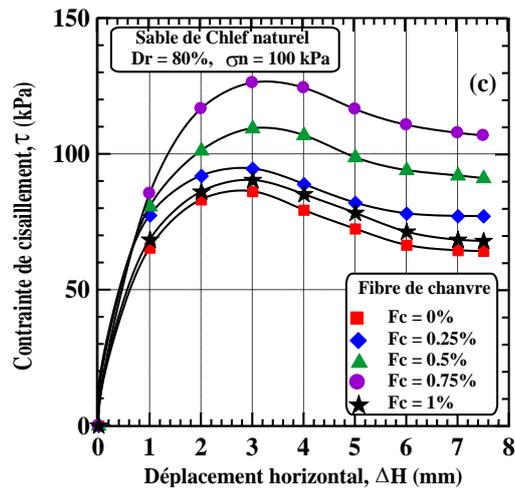
**Figure 4.2:** Variations de la déformation volumique ( $\Delta V$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) effectué sur des échantillons non renforcés et renforcés par différents types de fibre sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$  kPa) et une densité relative moyenne ( $D_r = 50\%$ ). (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.

#### 4.2.2. Etat dense ( $D_r = 80\%$ )

La figure 4.3 montre l'évolution de la résistance au cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) des échantillons denses ( $D_r = 80\%$ ) non renforcés et renforcés par fibres de verre,

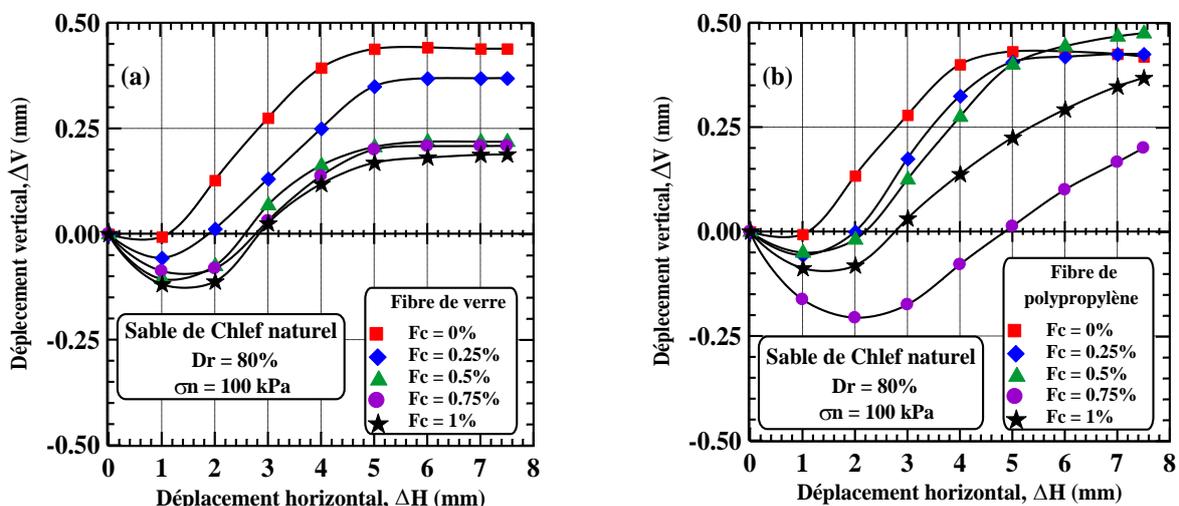
de polypropylène et de chanvre, et soumis à une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$  kPa). Nous pouvons constater sur la figure 4.3a, 4.3b et 4.3c que la résistance au cisaillement des échantillons renforcés augmente d'une manière significative avec l'augmentation de la teneur en fibre sous une contrainte normale constante pour les trois types de fibres étudiés. Cependant, les valeurs maximales de la résistance au cisaillement ont enregistré une nette augmentation passant de 86.25 kPa pour les sols non renforcés ( $F_c = 0\%$ ) à  $\tau_{max} = 94.67, 108.14, 84.67$  et  $80.41$  kPa pour des échantillons renforcés par fibres de verre (figure 4.3a), à des teneurs en fibres de  $F_c = 0.25\%, 0.5\%, 0.75\%$  et  $1\%$  respectivement. Pour le deuxième et troisième type de fibres (polypropylène et chanvre), les valeurs maximales de la résistance au cisaillement ont enregistré une nette augmentation passant de  $\tau_{max} = 94.67, 115.14, 123.17$  à  $104.06$  kPa pour des échantillons renforcés avec des fibres de polypropylène (figure 4.3b). Quant aux échantillons renforcés par fibres de chanvre, les valeurs maximales de la résistance au cisaillement ont enregistré une augmentation passant de  $\tau_{max} = 94.67, 109.44, 126.25$  à  $90.44$  kPa pour les mêmes teneurs en fibres utilisés pour les deux types de fibres étudiés auparavant (Figure 4.3c).

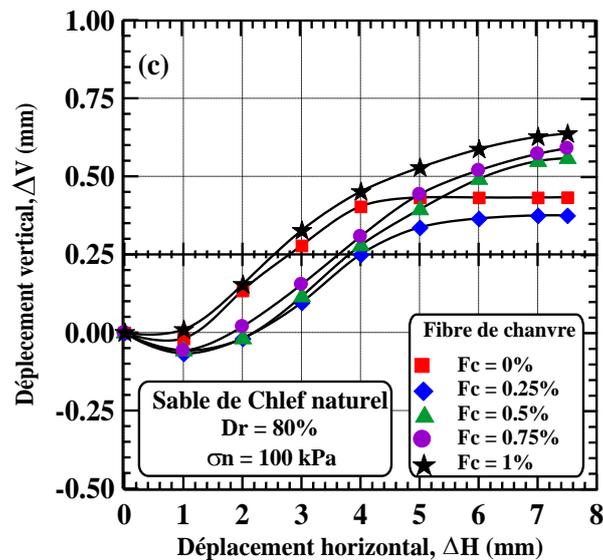




**Figure 4.3:** Evolution de la résistance au cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) des échantillons non renforcés et renforcés par différents types de fibre sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$  kPa) et une densité relative dense ( $D_r = 80\%$ ). (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.

La variation de la déformation volumique ( $\Delta V$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) pour les échantillons non renforcés et renforcés sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$  kPa) et une densité relative dense ( $D_r = 80\%$ ) sont présentées dans les figures (4.4a, 4.4b et 4.4c). Le comportement volumique des sols renforcés par fibres à un état dense est similaire à celui des échantillons préparés à un état moyennement dense, où on remarque qu'il s'ensuit d'une augmentation de la teneur en fibres une augmentation de la contractance du sol renforcé suivie d'une dilatance. Cette phase de contractance-dilatance est plus prononcée pour les échantillons de sol renforcé par fibres de polypropylène comparé à ceux renforcés par fibres de verre ou fibres de chanvre. Ceci est dû à un nombre plus important d'interfaces faibles pour les échantillons renforcés par fibres de polypropylène comparés à ceux renforcés par fibres de verre ou de chanvre.





**Figure 4.4:** Variations de la déformation volumique ( $\Delta V$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) des échantillons non renforcés et renforcés par différents types de fibre sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$  kPa) et une densité relative dense ( $D_r = 80\%$ ). (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.

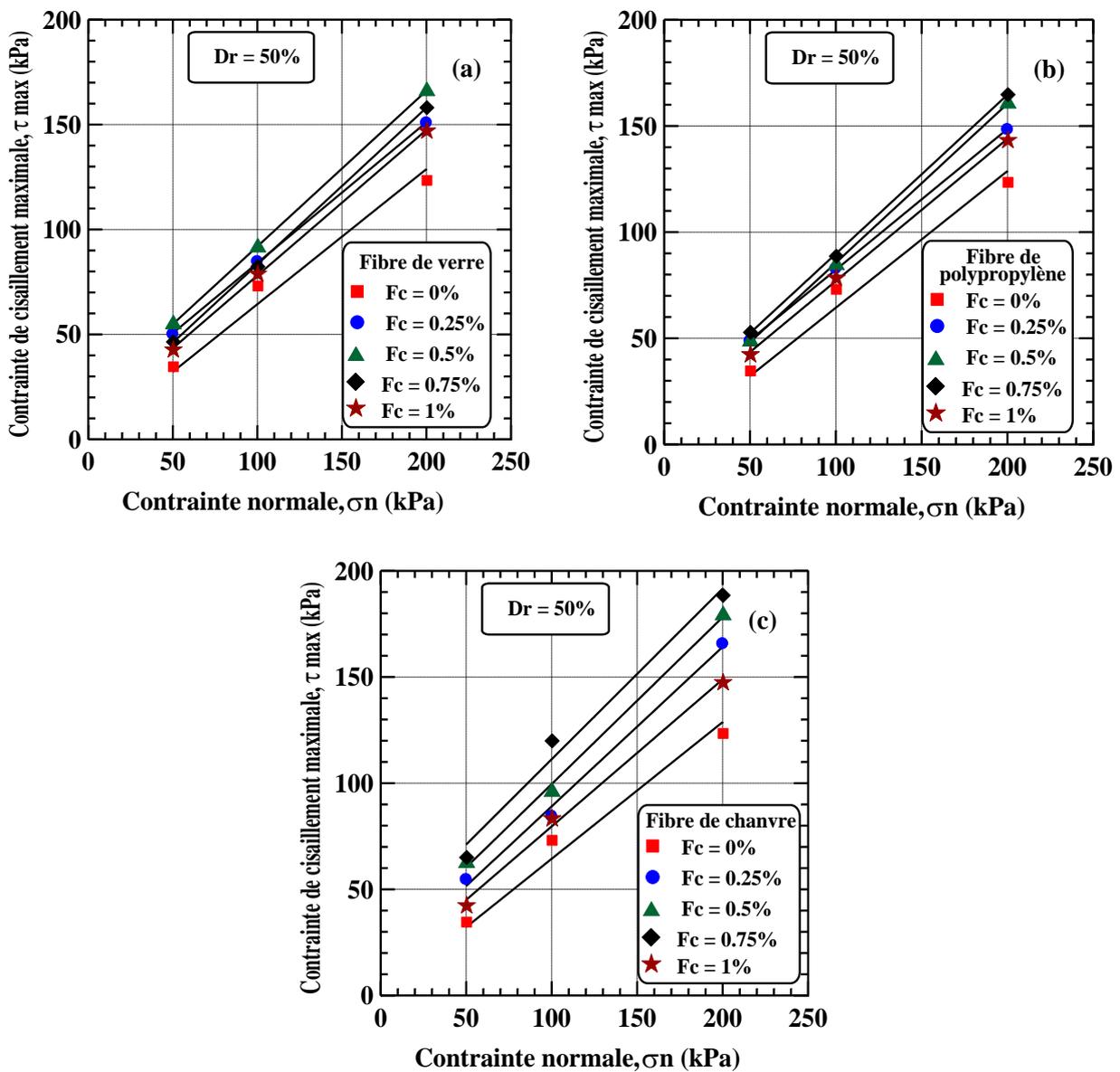
### 4.3. Effet de la teneur en fibre sur les caractéristiques mécaniques

#### 4.3.1. Etat moyennement dense ( $D_r = 50\%$ )

La figure 4.5 illustre l'évolution de la résistance au cisaillement maximale ( $\tau_{max}$ ) en fonction de la teneur en fibre ( $F_c$ ) et de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ) pour des échantillons préparés à l'état moyennement dense et renforcés avec trois types de fibre (verre, polypropylène et chanvre). Il ressort des figures présentées que la résistance au cisaillement maximale ( $\tau_{max}$ ) augmente non linéairement avec l'augmentation de la teneur en fibres et la contrainte normale ( $\sigma_n$ ). Nous avons constaté qu'il existe une teneur en fibres optimale propre à chaque type de fibre étudiée. Une fois cette teneur en fibres optimale est dépassée, les valeurs de la résistance au cisaillement maximale sont réduites de façon significative.

Parakar et Sridhar (2002) expliquent qu'une augmentation de la teneur en fibres au-delà d'un pourcentage optimal réduit les particules de sol et entraîne donc une moindre mobilisation de la cohésion qui diminue la résistance au cisaillement du composite sol-fibre. On note que les valeurs enregistrées pour les échantillons de sol renforcé par fibres de chanvre montrent de meilleures performances que celles obtenues avec des fibres de verre ou de polypropylène. Les valeurs maximales de la résistance au cisaillement pour les échantillons renforcés par fibres de verre à une teneur en fibres optimale ( $F_c = 0.5\%$ ) sont:  $\tau_{max} = 55.06, 91.97$  et  $166.19$  kPa

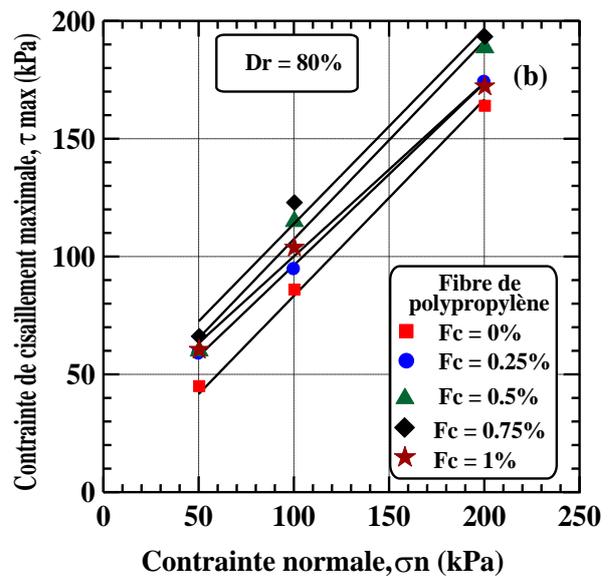
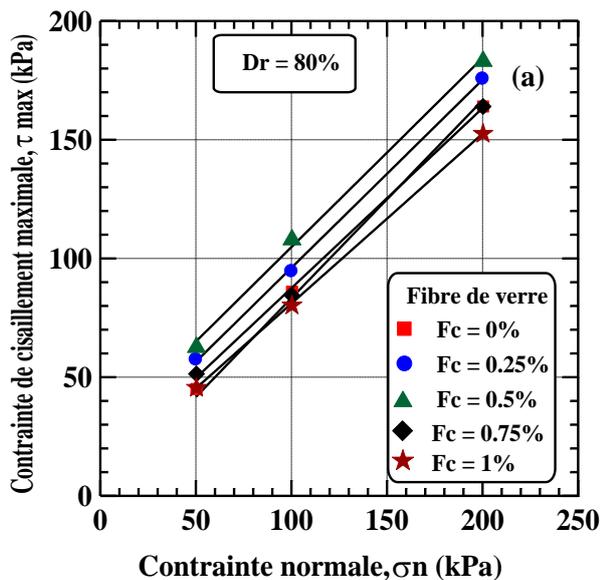
et de  $\tau_{\max} = 53.02, 92.97$  et  $165$  kPa pour les échantillons renforcés par fibres de polypropylène à une teneur optimale ( $F_c = 0.75\%$ ) pour des contraintes normales ( $\sigma_n = 50, 100$  et  $200$  kPa), respectivement (Figure 4.5a et 4.5b). Les meilleures valeurs de ( $\tau_{\max}$ ) enregistrées sont pour les échantillons de sol renforcés par fibres de chanvre à une teneur en fibres optimale ( $F_c = 0.75\%$ ), celles-ci sont:  $\tau_{\max} = 65.25, 120.25$  et  $188.69$  kPa (Figure 4.5c). Les valeurs maximales de la résistance au cisaillement enregistrées pour un sol non renforcé sont:  $\tau_{\max} = 34.81, 73.28$  et  $123.67$  kPa; on note donc une nette augmentation des valeurs maximales de la résistance au cisaillement maximal avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à une teneur en fibres optimale pour chaque type de fibre étudié.

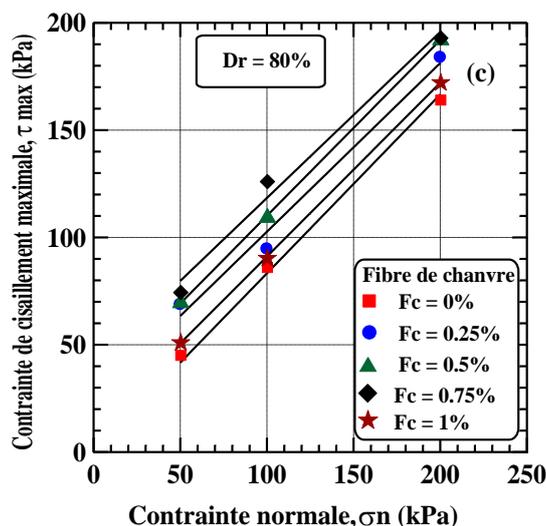


**Figure 4.5:** Evolution de la résistance au cisaillement maximale ( $\tau_{\max}$ ) en fonction du teneur en fibre ( $F_c$ ) et de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ) pour des échantillons préparés à l'état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.

### 4.3.2. Etat dense ( $D_r = 80\%$ )

La figure 4.6a, 4.6b et 4.6c indiquent les variations de la contrainte de cisaillement maximal ( $\tau_{\max}$ ) en fonction de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ) pour le sable Chlef, à l'état dense non renforcé et renforcé avec des fibres de verre (Figure 4.6a), des fibres de polypropylène (Figure 4.6b) et des fibres de chanvre (Figure 4.6c). Les valeurs maximales de la résistance au cisaillement enregistrées pour les fibres de verre à une teneur en fibres optimale ( $F_c = 0.5\%$ ) sont de:  $\tau_{\max} = 62.78, 108.14$  et  $183.32$  kPa pour des contraintes normales ( $\sigma_n = 50, 100$  et  $200$  kPa), respectivement (figure 4.6a). Quant aux deuxième et troisième type de fibres (polypropylène et chanvre), les valeurs maximales de la résistance au cisaillement enregistrées sont de:  $\tau_{\max} = 66.38, 123.3$  et  $193.58$  kPa pour les fibres de polypropylène à une teneur en fibres optimale ( $F_c = 0.75\%$ ) (Figure 4.6b), et de  $\tau_{\max} = 74.58, 126.25$  et  $193.11$  kPa pour les échantillons renforcés par fibres de chanvre à une teneur optimale ( $F_c = 0.75\%$ ) (Figure 4.6c). Il ressort à partir des résultats obtenus des figures 4.6a, 4.6b et 4.6c, une nette supériorité des valeurs de la contrainte de cisaillement maximal des échantillons renforcés à différents pourcentages en fibres comparé à celle d'échantillons non renforcés.





**Figure 4.6:** Evolution de la résistance au cisaillement maximale ( $\tau_{\max}$ ) en fonction du teneur en fibre ( $F_c$ ) et de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ) pour des échantillons préparés à l'état dense ( $D_r = 80\%$ ),  
 (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.

L'équation de l'enveloppe du cercle de Mohr-Coulomb associée aux différents essais relatifs au sable non renforcés et renforcés se traduit par la relation suivante:

$$\tau_{\max} = A \cdot \sigma_n + B \tag{4.1}$$

Où: A est la pente de la droite (angle de frottement) et B est l'ordonnée à l'origine exprimant la cohésion du sable analysé.

Tableau 4.1, 4.2 et 4.3 donnent les coefficients A, B et le coefficient de détermination ( $R^2$ ) correspondants au mélange sable de Chlef, fibres de verre, fibres de polypropylène et fibres de chanvre.

**Tableau 4.1:** Coefficients A, B et  $R^2$  de l'équation (4.1)

Matériaux	$D_r$ (%)	$F_c$ (%)	A	B	$R^2$
Sable de Chlef-fibres de verre	50	0	0.57	0.00	0.99
		0.25	0.72	16.78	0.99
		0.5	0.91	17.95	0.99
		0.75	0.92	9.31	0.99
		1	0.83	8.72	0.99
	80	0	0.90	0.00	0.99
		0.25	1.01	17.02	0.99
		0.5	1.13	25.19	0.99
		0.75	1	19.28	0.99
		1	0.89	10.91	0.99

**Tableau 4.2:** Coefficients A, B et R<sup>2</sup> de l'équation (4.1)

Matériaux	D <sub>r</sub> (%)	Fc (%)	A	B	R <sup>2</sup>
Sable de Chlef-fibres de polypropylène	50	0	0.57	0.00	0.99
		0.25	0.78	15.99	1.00
		0.5	0.93	15.51	0.99
		0.75	0.98	17.02	0.99
		1	0.95	3.81	0.99
	80	0	0.90	0.00	0.99
		0.25	0.94	24.46	0.99
		0.5	1.12	25.08	0.98
		0.75	1.19	31.24	0.989
		1	0.97	13.78	0.99

**Tableau 4.3:** Coefficients A, B et R<sup>2</sup> de l'équation (4.1)

Matériaux	D <sub>r</sub> (%)	Fc (%)	A	B	R <sup>2</sup>
Sable de Chlef-fibres de chanvre	50	0	0.57	0.00	0.99
		0.25	0.92	16.17	0.99
		0.5	1.01	20.70	0.99
		0.75	1.04	31.03	0.98
		1	0.43	30.27	0.89
	80	0	0.90	0.00	0.99
		0.25	0.97	28.39	0.98
		0.5	1.06	28.67	0.99
		0.75	1.16	41.15	0.98
		1	0.86	17.11	0.99

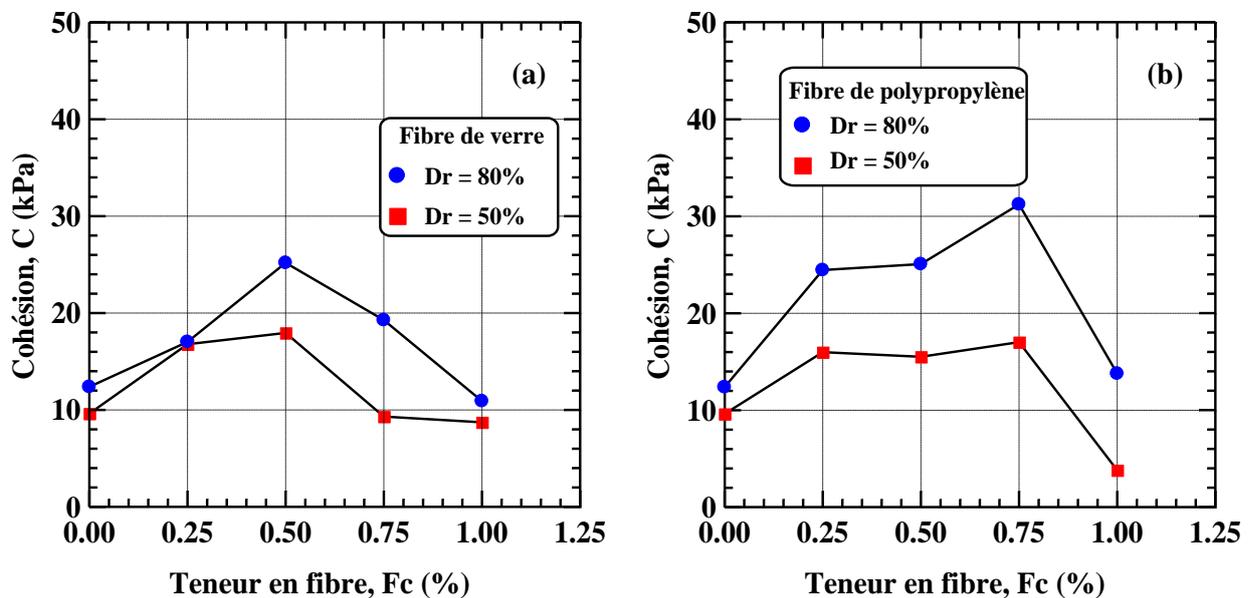
Les paramètres de résistance au cisaillement (angle de frottement interne et cohésion) obtenus à partir d'une analyse de régression linéaire pour différents types et teneur en fibres à l'état moyennement dense et dense sont présentés dans le tableau 4.4.

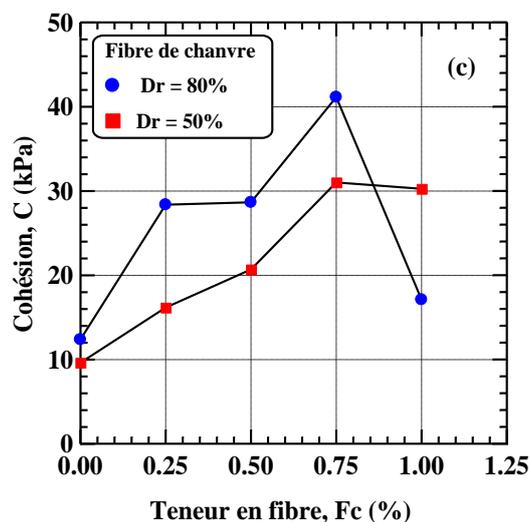
**Tableau 4.4:** Paramètres de résistance au cisaillement (angle de frottement interne et cohésion) d'échantillons renforcés par différents types et teneur en fibre à l'état moyennement dense et dense.

Densité relative	Fc (%)	Fibre de verre		Fibre de polypropylène		Fibre de chanvre	
		C (kPa)	φ (°)	C (kPa)	φ (°)	C (kPa)	φ (°)
D <sub>r</sub> = 50%	0	9.62	29.91	9.62	29.91	9.62	29.91
	0.25	16.78	35.75	15.99	37.93	16.17	42.63
	0.5	19.75	42.46	15.51	43.03	20.70	45.21
	0.75	9.31	42.51	17.02	44.57	31.03	46.01
	1	8.72	39.82	3.81	43.54	30.27	23.38
D <sub>r</sub> = 80%	0	12.38	42.06	12.38	42.06	12.38	42.06
	0.25	17.02	45.21	24.46	43.32	28.39	44.06
	0.5	25.19	48.61	25.08	48.30	28.67	46.58
	0.75	19.28	45	31.24	49.96	41.15	49.29
	1	10.91	41.65	13.78	44.29	17.11	40.85

#### 4.4. Effet de la teneur en fibres sur la cohésion (C)

La figure 4.7 montre l'évolution de la cohésion (C) en fonction de la teneur en fibres pour trois types de fibres (verre, polypropylène et chanvre) pour des pourcentages de fibres variant de  $F_c = 0\%$  à  $1\%$  à l'état moyennement dense et dense (Figure 4.7a, 4.7b et 4.7c). On constate de ce qui ressort des figures, une amélioration effective du sable renforcé par inclusion en fibres distribué de façon aléatoire, indiquant des valeurs élevées de la cohésion obtenue grâce à l'inclusion de fibres dans la masse du sol. Les courbes indiquent aussi qu'il existe une cohésion initiale due à la présence de fines argileuses faiblement plastiques. Les valeurs de cohésion à l'état moyennement dense pour le sable de Chlef non renforcé, renforcé par fibres de verre sont:  $C = 9.62, 16.78, 17.95, 9.31$  et  $8.72$  kPa. Pour le deuxième type (fibres de polypropylène), les valeurs de la cohésion sont:  $C = 12.38, 15.99, 15.51, 17.02$  et  $3.81$  kPa. Pour le troisième type (fibres de chanvre), les valeurs de la cohésion sont:  $C = 9.62, 16.17, 20.7, 31.03$  et  $30.27$  kPa; ces valeurs varient selon les pourcentages en fibres par rapport à la masse de sol ( $F_c = 0, 0.25, 0.5, 0.75$  et  $1\%$ ), respectivement. Pour les échantillons denses, les valeurs de la cohésion varient de  $0$  kPa pour le sable non renforcé à  $25.19$  kPa pour le sable renforcé avec fibres de verre et jusqu'à  $31.24$  kPa pour le sable renforcé avec la fibre de polypropylène, tandis que pour le sable renforcé par fibres de chanvre, la valeur de la cohésion atteint est de  $49.29$  kPa. Ce qui montre des meilleures performances mécaniques à l'état dense que celles obtenues à l'état moyennement dense.

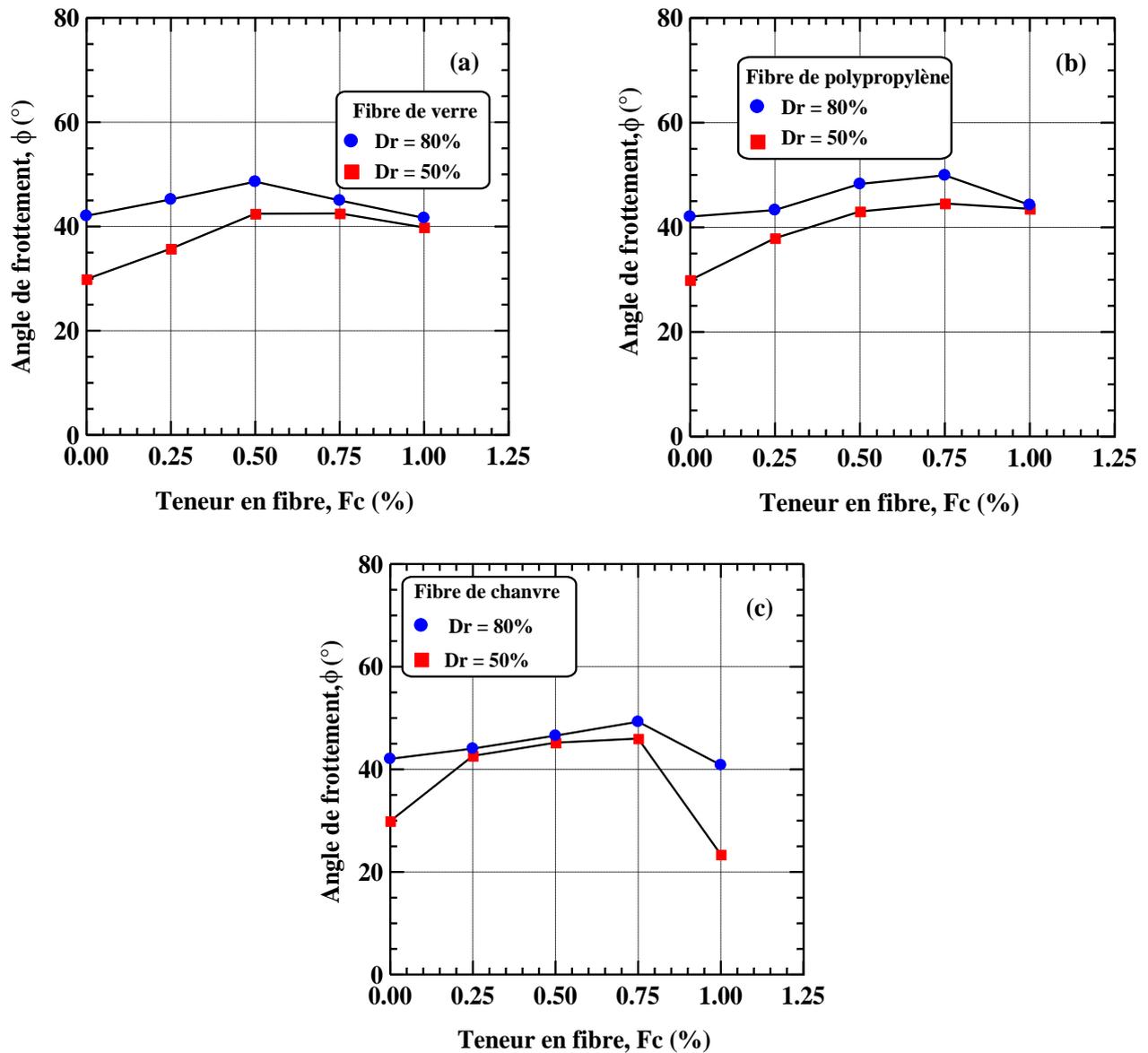




**Figure 4.7:** Evolution de la cohésion ( $C$ ) en fonction de la teneur en fibre ( $F_c$ ) pour des échantillons renforcés par fibres à l'état moyennement dense et dense, (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.

#### 4.5. Effet de la teneur en fibre sur l'angle de frottement ( $\phi$ )

La figure 4.8 montre la variation de l'angle de frottement ( $\phi$ ) en fonction de la teneur en fibre ( $F_c$ ) pour trois types de fibres différentes (Figure 4.8a, 4.8b et 4.8c), à l'état moyennement dense et dense. Les résultats indiquent qu'il existe une augmentation significative de l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) avec l'augmentation de la teneur en fibre jusqu'à une teneur en fibre optimale propre à chaque type de fibre. Une fois cette teneur atteinte les valeurs de l'angle de frottement interne diminuent, que ce soit à l'état moyennement dense ou à l'état dense avec les trois types de fibre utilisés. À cet effet, pour le sable moyennement dense, les valeurs de l'angle de frottement pour le sable renforcé par fibres de verre ont enregistré les valeurs suivantes:  $\phi = 29.91^\circ$ ,  $35.75^\circ$ ,  $42.46^\circ$ ,  $42.51^\circ$  et  $39.82^\circ$ , pour le deuxième type (fibre de polypropylène), les valeurs de l'angle de frottement enregistrées sont:  $\phi = 29.91^\circ$ ,  $37.93^\circ$ ,  $43.03^\circ$ ,  $44.57^\circ$  et  $43.54^\circ$ . En ce qui concerne le troisième type de fibre (chanvre), les valeurs de l'angle de frottement enregistrées sont:  $\phi = 29.91^\circ$ ,  $42.63^\circ$ ,  $45.21^\circ$ ,  $46.01^\circ$  et  $23.38^\circ$ , ces valeurs sont relevées pour des pourcentages de fibre  $F_c = 0\%$ ,  $0.25\%$ ,  $0.5\%$ ,  $0.75\%$  et  $1\%$ , respectivement. Les mêmes observations sont faites pour le sable de Chlef renforcé par fibres à l'état dense. Cependant, l'augmentation des valeurs de l'angle de frottement interne à l'état dense est moins importante que celle des valeurs à l'état de densité moyenne.



**Figure 4.8:** Evolution de l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) en fonction de la teneur en fibre ( $F_c$ ) pour des échantillons renforcés par fibres à l'état moyennement dense et dense, (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.

#### 4.6. Effet de la teneur en fibre sur le coefficient de renforcement ( $S_r$ )

Afin d'évaluer l'effet du renforcement par différents types de fibres sur la résistance au cisaillement du sable, nous avons introduit le rapport de résistance au cisaillement ( $S_r$ ), défini par Zhang et al. (2006) selon la relation suivante:

$$S_r = \tau_{\max r} / \tau_{\max nr} \quad (4.2)$$

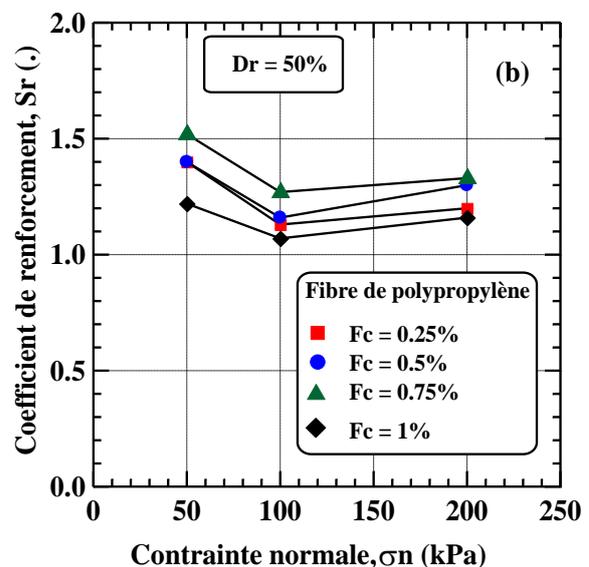
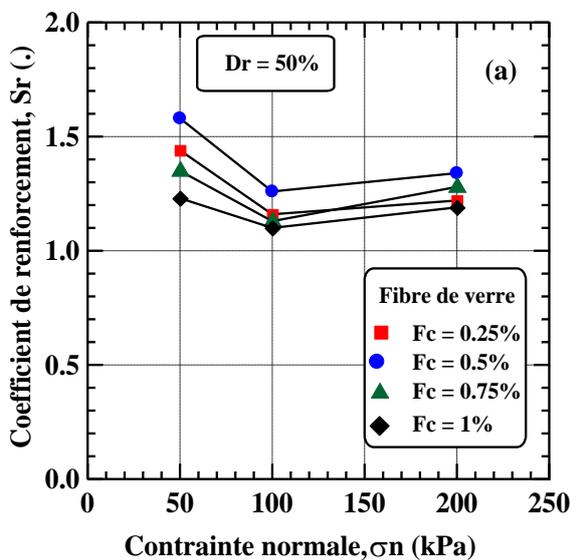
D'où:  $\tau_{\max r}$ : Résistance au cisaillement maximale du sable renforcé.

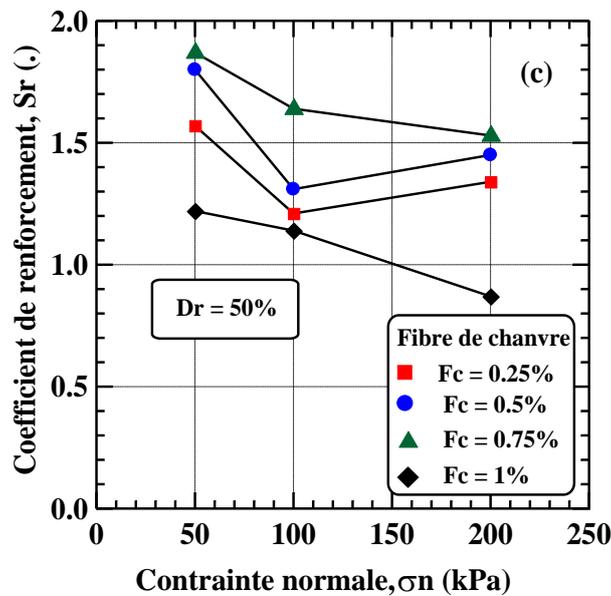
$\tau_{\max nr}$ : Résistance au cisaillement maximale du sable non renforcé.

Les valeurs du rapport de résistance au cisaillement ( $S_r$ ) pour différents types et teneur en fibre sont calculées et résumés dans le tableau 4.5. La figure 4.9 montre la variation du rapport de résistance au cisaillement pour le sable renforcé à celui du sable non renforcé à un état moyennement dense et dense sous différentes contraintes normales ( $\sigma_n = 50, 100, 200$  kPa).

A l'état moyennement dense, on constate que le rapport de résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur en fibre jusqu'à une teneur optimale en fibre propre à chaque type de fibre et diminue avec l'augmentation de la contrainte normale. Les valeurs du rapport de résistance au cisaillement ( $S_r$ ) enregistrés pour chaque type de fibres soumis à une contrainte de cisaillement ( $\sigma_n = 100$  kPa) pour des teneurs en fibres ( $F_c = 0.25\%, 0.5\%, 0.75\%$  et  $1\%$ ), respectivement sont énumérées:

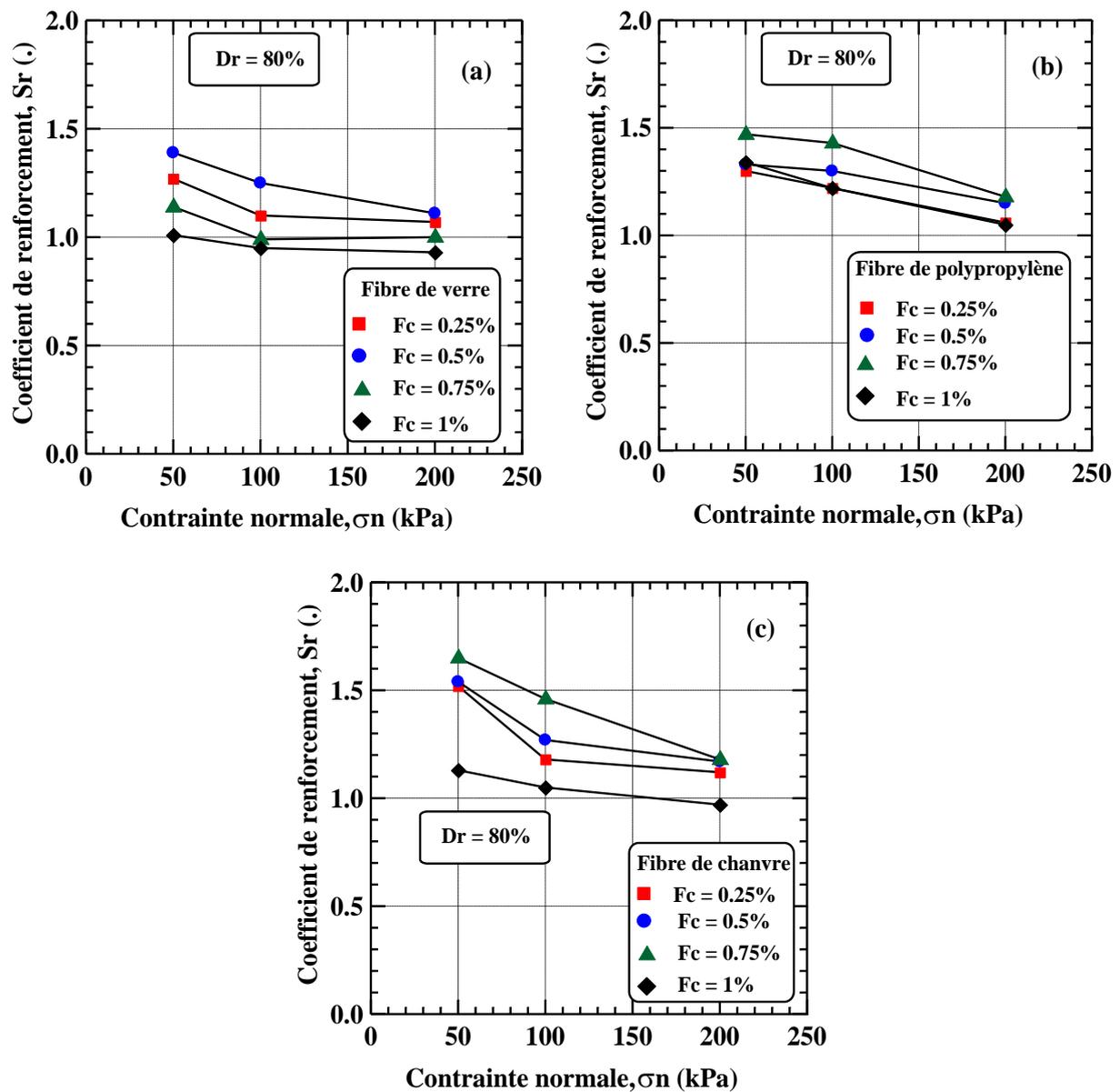
- ◆ Pour le premier type de fibres (fibres de verre) les valeurs de ( $S_r$ ) atteintes sont:  $S_r = 1.16, 1.26, 1.13, 1.10$  (Figure 4.9a);
- ◆ Pour le deuxième type de fibre (fibre de polypropylène) les valeurs de ( $S_r$ ) enregistrées sont:  $S_r = 1.13, 1.16, 1.27, 1.07$  (Figure 4.9b);
- ◆ Pour le dernier type de fibres (fibres de chanvre), les valeurs de ( $S_r$ ) atteintes sont:  $S_r = 1.21, 1.31, 1.64, 1.14$  (Figure 4.9c);





**Figure 4.9:** Evolution du coefficient de renforcement ( $S_r$ ) en fonction de la teneur en fibre pour des échantillons renforcés par fibres à l'état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.

À l'état dense (Figure 4.10), les résultats indiquent que le rapport de résistance ( $S_r$ ) du sable renforcé par fibres augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à une teneur optimale propre à chaque type de fibres. L'amélioration du sable composite est caractérisée par des valeurs du rapport de résistance élevée plus particulièrement pour de faible contrainte normale ( $\sigma_n = 50$  kPa). Ces résultats sont corroborés par plusieurs chercheurs activant dans le domaine du renforcement des sols (Denine et al. 2016, Bouaricha et al. 2017). Shao et al. (2014) ont recommandé l'utilisation de la technique de renforcement par inclusion en fibres pour améliorer les propriétés mécaniques des applications géotechniques proches de la surface en vue que cette technique est plus efficace pour des échantillons à faible contrainte normale verticale.



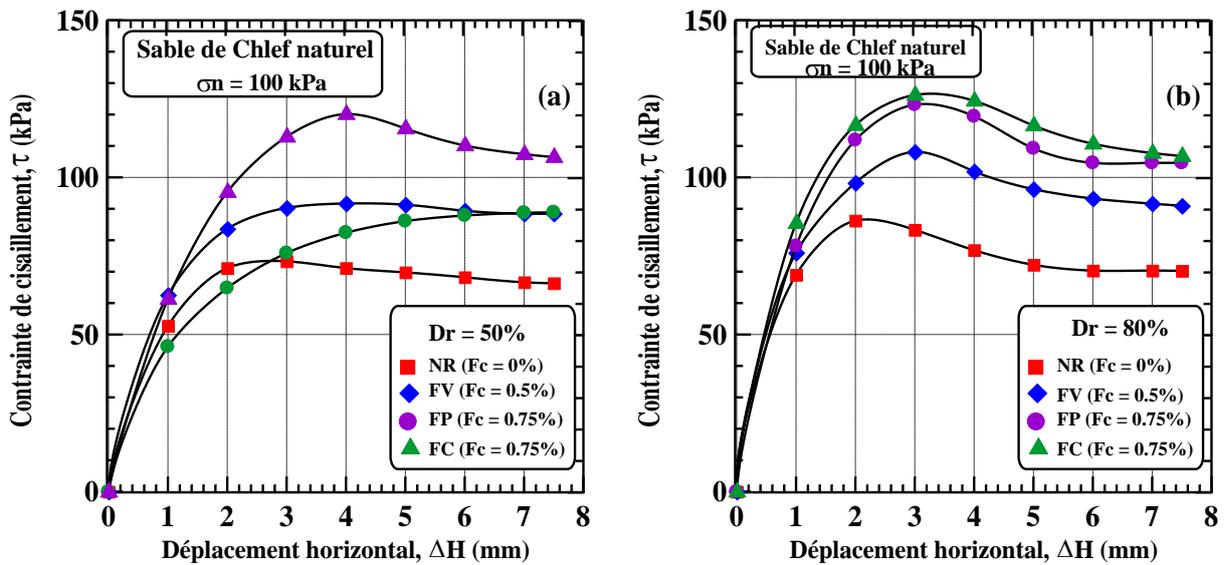
**Figure 4.10:** Evolution du coefficient de renforcement ( $S_r$ ) en fonction de la teneur en fibre pour des échantillons renforcés par fibres à l'état dense ( $D_r = 80\%$ ), (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.

**Tableau 4.5:** Valeurs du rapport de résistance au cisaillement ( $S_r$ ) pour des échantillons de sable renforcé par différents types et teneur en fibre à l'état moyennement dense et dense.

		Fibre de verre			Fibre de polypropylène			Fibre de chanvre		
		$\sigma_n$ (kPa)			$\sigma_n$ (kPa)			$\sigma_n$ (kPa)		
Densité relative	Fc (%)	50	100	200	50	100	200	50	100	200
		0.25	1.44	1.16	1.22	1.4	1.13	1.2	1.57	1.21
$D_r = 50\%$	0.5	1.58	1.26	1.34	1.4	1.16	1.3	1.8	1.31	1.45
	0.75	1.35	1.13	1.28	1.52	1.27	1.33	1.87	1.64	1.53
	1	1.23	1.10	1.19	1.22	1.07	1.16	1.22	1.14	0.87
$D_r = 80\%$	0.25	1.27	1.1	1.07	1.3	1.22	1.06	1.52	1.18	1.12
	0.5	1.39	1.25	1.11	1.33	1.3	1.15	1.54	1.27	1.17
	0.75	1.14	0.99	1	1.47	1.43	1.18	1.65	1.46	1.18
	1	1.01	0.95	0.93	1.34	1.22	1.05	1.13	1.05	0.97

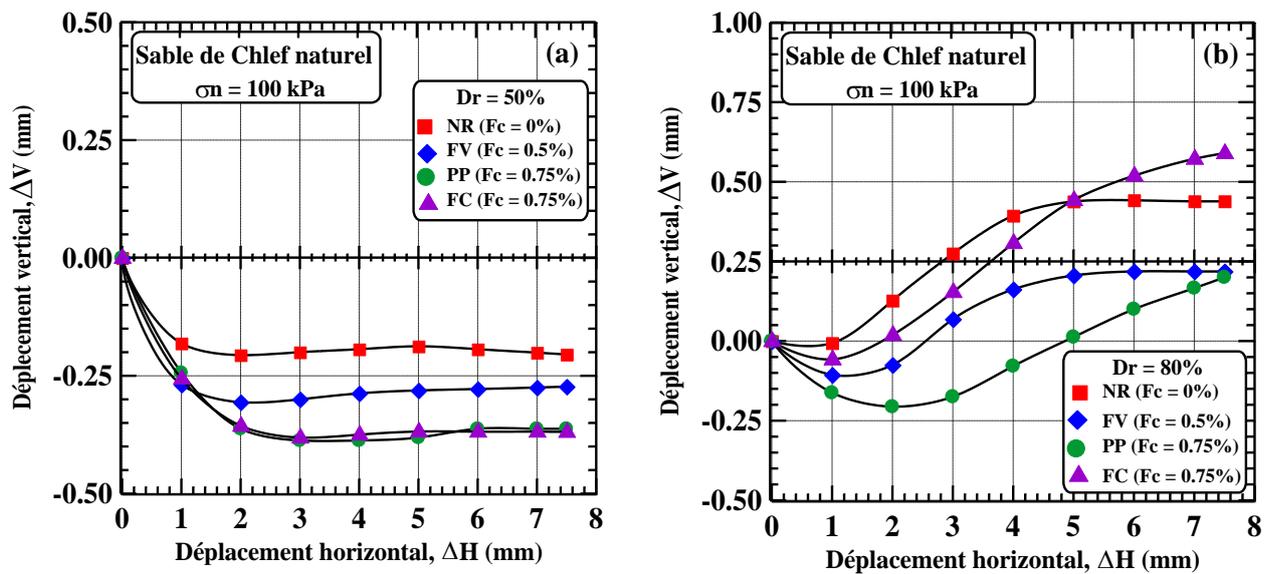
#### 4.7. Effet du type de fibres sur la contrainte de cisaillement

La figure 4.11a, 4.11b et 4.11c montrent l'évolution de la résistance au cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) réalisés sur des échantillons non renforcés et renforcés par différents types de fibres sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$  kPa) à un état moyennement dense et dense. Il ressort de la figure 4.11 que la résistance du sable caractérisée par la contrainte de cisaillement augmente d'une manière significative pour chaque type de fibre inclus dans la masse du sol. Cependant, les valeurs de la résistance au cisaillement maximal obtenues pour des échantillons renforcés par fibre de chanvre s'avèrent être les échantillons les plus performants comparés aux échantillons renforcés par fibres de verre ou par fibres de polypropylène. Les échantillons renforcés par fibres de verre, de polypropylène et de chanvre et soumis à une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$  kPa), ont enregistré les valeurs optimales suivantes:  $\tau_{max} = 91.72$ , 88.92 et 120.17 kPa, respectivement (Figure 4.11a). La figure 4.11b, caractérise les mêmes observations que celles observées dans la figure 4.11a de la résistance au cisaillement réalisée sur des échantillons à l'état moyennement dense et les valeurs de la résistance au cisaillement maximal obtenues à l'état dense ont enregistré les valeurs optimales suivantes:  $\tau_{max} = 108.14$ , 123.17 et 126.25 kPa, pour des échantillons renforcés par fibres de verre, de polypropylène et de chanvre, respectivement. On déduit des valeurs enregistrées que le renforcement par fibres de polypropylène et de chanvre paraît plus rigide que par les fibres de verre du fait de l'écart de résistance élevée entre les trois types de fibres utilisées.



**Figure 4.11:** Evolution de la résistance au cisaillement ( $\tau$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) réalisés sur des échantillons non renforcés et renforcés par différentes types de fibre sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$  kPa), (a) état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (b) état dense ( $D_r = 80\%$ ).

Les variations de la déformation volumique ( $\Delta V$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) effectué sur des échantillons non renforcés et renforcés par différent type de fibres sont présentées dans la figure 4.12. Les résultats expérimentaux révèlent que l'inclusion de fibres provoque une diminution significative de la phase de dilatance en particulier pour les échantillons renforcés par fibres de polypropylène et de chanvre. Choi et al. (2016) attribuent cela à leur faible module d'élasticité (14 et 19 GPa, respectivement), les fibres à faible module d'élasticité ont tendance à former des agglomérats lorsque celles-ci sont présentes en grande quantité. En revanche, le module d'élasticité de la fibre de verre est relativement plus important (73 GPa) ce qui lui permet de mieux se disperser dans la matrice du sol.



**Figure 4.12:** Variations de la déformation volumique ( $\Delta V$ ) en fonction du déplacement horizontal ( $\Delta H$ ) effectué sur des échantillons non renforcés et renforcés par différents types de fibre sous une contrainte normale constante ( $\sigma_n = 100$  kPa), (a) état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (b) état dense ( $D_r = 80\%$ ).

#### 4.8. Effet du type de fibre sur les caractéristiques mécaniques

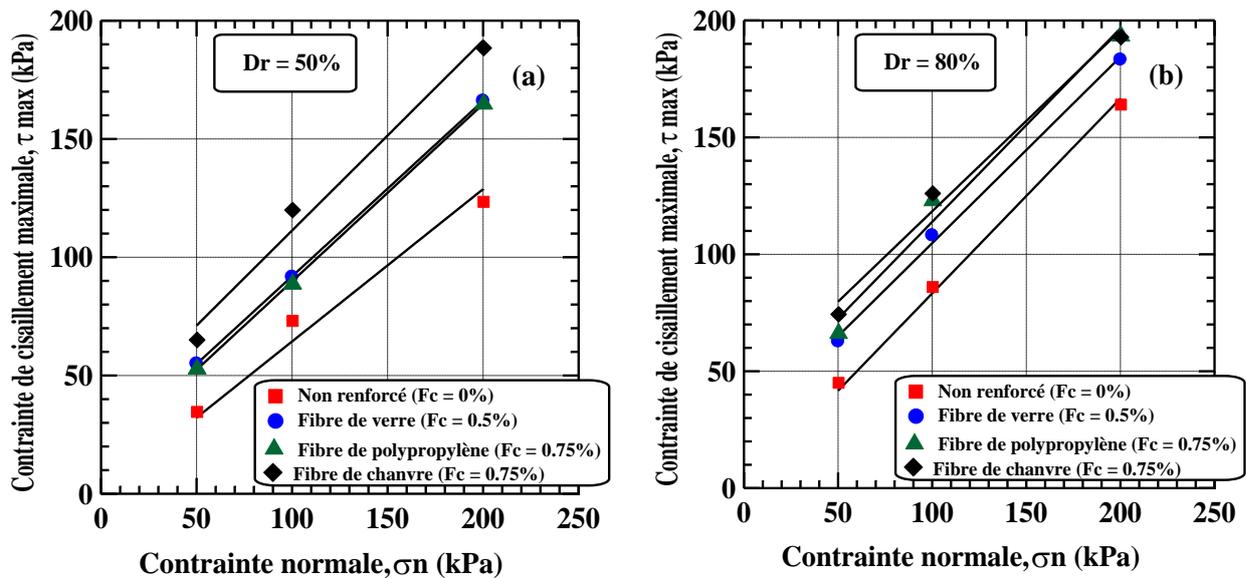
La figure 4.13 illustre l'évolution de la résistance au cisaillement maximale ( $\tau_{max}$ ) en fonction du type de fibres (verre, polypropylène et chanvre) et de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ) pour des échantillons préparés à l'état moyennement dense et dense. Il ressort d'après les deux figures présentées que la résistance au cisaillement maximale augmente pour chaque type de fibres utilisé pour les deux états de densité relative ( $D_r = 50\%$  et  $80\%$ ). Cependant, on note que les valeurs enregistrées avec les fibres de chanvre montrent de meilleures performances que celles obtenues à partir de premier et deuxième type de fibres (verre et polypropylène) à un état de densité moyenne. Les échantillons non renforcés et renforcés par différents types de fibres (verre, polypropylène et chanvre) à un état moyennement dense (Figure 4.13a), sont caractérisés par les valeurs suivantes:

- ◆  $\tau_{max} = 34.81, 73.28$  et  $123.67$  kPa pour les échantillons non renforcés;
- ◆  $\tau_{max} = 55.06, 91.97, 166.19$  kPa pour les échantillons renforcés par fibre de verre;
- ◆  $\tau_{max} = 53.02, 98.97$  et  $165$  pour les échantillons renforcés par fibre de polypropylène;
- ◆  $\tau_{max} = 65.25, 120.25$  et  $188.69$  kPa pour les échantillons renforcés par fibre de chanvre.

Pour des contraintes normales  $\sigma_n = 50, 100$  et  $200$  kPa, respectivement.

A un état dense (Figure 4.13b), les valeurs de la résistance au cisaillement maximal sont les suivantes:  $\tau_{max} = 45.25, 86.25$  et  $164.25$  kPa, pour des échantillons non renforcés;  $\tau_{max} = 62.78,$

108.14 et 183.32 kPa pour les échantillons renforcés par fibre de verre;  $\tau_{\max} = 66.38, 123.3$  et  $193.58$  kPa pour les échantillons renforcés par fibre de polypropylène et  $\tau_{\max} = 74.58, 126.25$  et  $193.11$  kPa pour les échantillons renforcés par fibre de chanvre. A partir des valeurs obtenues, on note qu'à un état dense, la résistance au cisaillement maximale des échantillons renforcés par fibres de polypropylène est concurrentielle à celles des échantillons renforcés par fibre de chanvre, ceci est dû à l'amélioration du contact des fibres de polypropylène aux grains de sable.

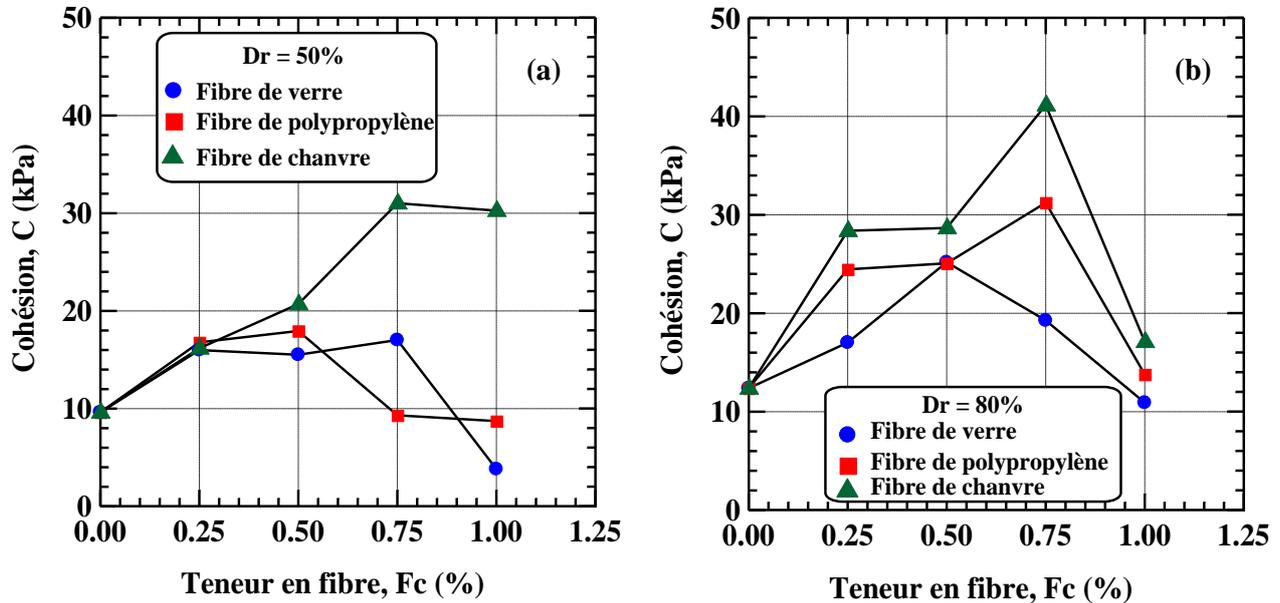


**Figure 4.13:** Evolution de la résistance au cisaillement maximale ( $\tau_{\max}$ ) en fonction du type de fibre et de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ), (a) état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (b) état dense ( $D_r = 80\%$ ).

#### 4.9. Effet du type de fibres sur la cohésion (C)

La figure 4.14 montre l'évolution de la cohésion en fonction du type de fibres, à l'état moyennement dense (Figure 4.14a) et dense (Figure 4.14b). Les résultats indiquent qu'il existe une augmentation significative de la cohésion avec l'augmentation de la teneur en fibres, que ce soit à l'état moyennement dense ou à l'état dense avec les trois types de fibres utilisés. La cohésion passe de 9.62 kPa ( $F_c = 0\%$ ) à 17.95 kPa pour le sable renforcé par fibres de verre a une teneur ( $F_c = 0.5\%$ ) et jusqu'à 17.02 kPa pour le deuxième type (fibre de polypropylène) a une teneur de ( $F_c = 0.75\%$ ). Pour le troisième type de fibre (chanvre), la cohésion atteint jusqu'à 31.03 kPa pour une teneur en fibre ( $F_c = 0.75\%$ ). Pour les échantillons denses, les valeurs de la cohésion varient de 12.38 kPa pour le sable non renforcé ( $F_c = 0\%$ ) à 25.19 kPa pour le sable renforcé avec fibre de verre et jusqu'à 31.24 kPa pour le sable renforcé avec la fibre de polypropylène, tandis que pour le sable renforcé par fibres de chanvre, la valeur de la cohésion atteint 49.29 kPa. Ce qui dénote de meilleures performances mécaniques à l'état dense que celles obtenus à l'état moyennement dense. On constate de ce qui ressort des deux figures, une amélioration effective du sable renforcé par

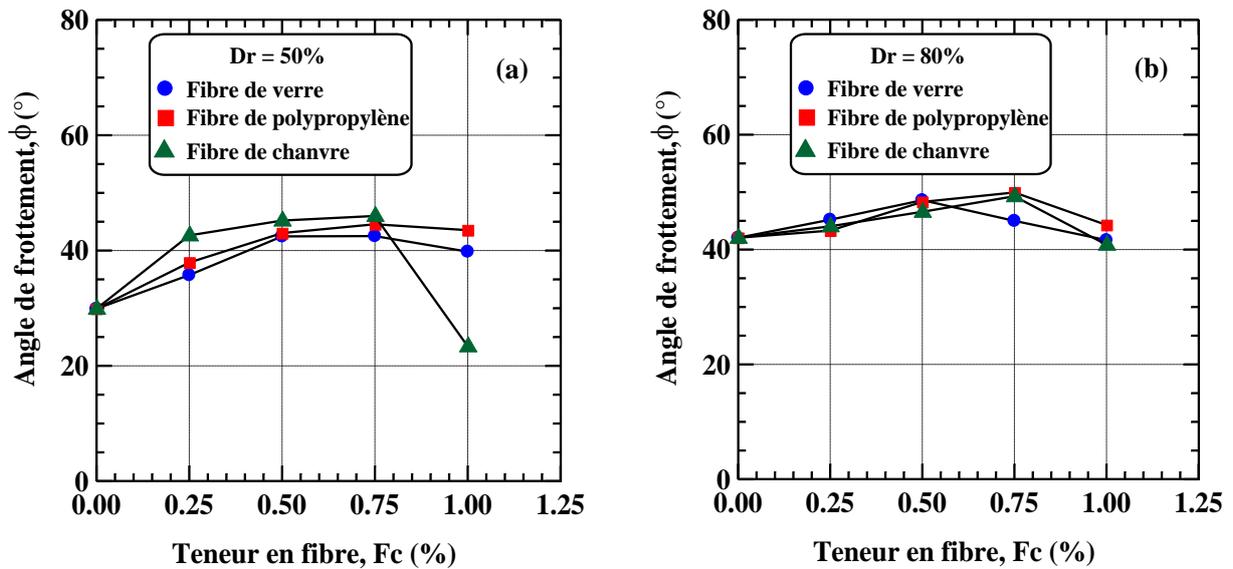
fibre, indiquant des valeurs élevées de la cohésion obtenue à partir de chaque type de fibre étudié. Cependant il est clair que les valeurs de la cohésion obtenue à partir des échantillons renforcés par fibres de chanvre sont bien supérieures à celles des échantillons renforcés par fibres de verre ou de polypropylène pour les deux états de densité étudiés ( $D_r = 50\%$  et  $D_r = 80\%$ ).



**Figure 4.14:** Evolution de la cohésion en fonction du type de fibre pour des échantillons renforcés par fibres, (a) état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (b) état dense ( $D_r = 80\%$ ).

#### 4.10. Effet du type de fibre sur l'angle de frottement ( $\phi$ )

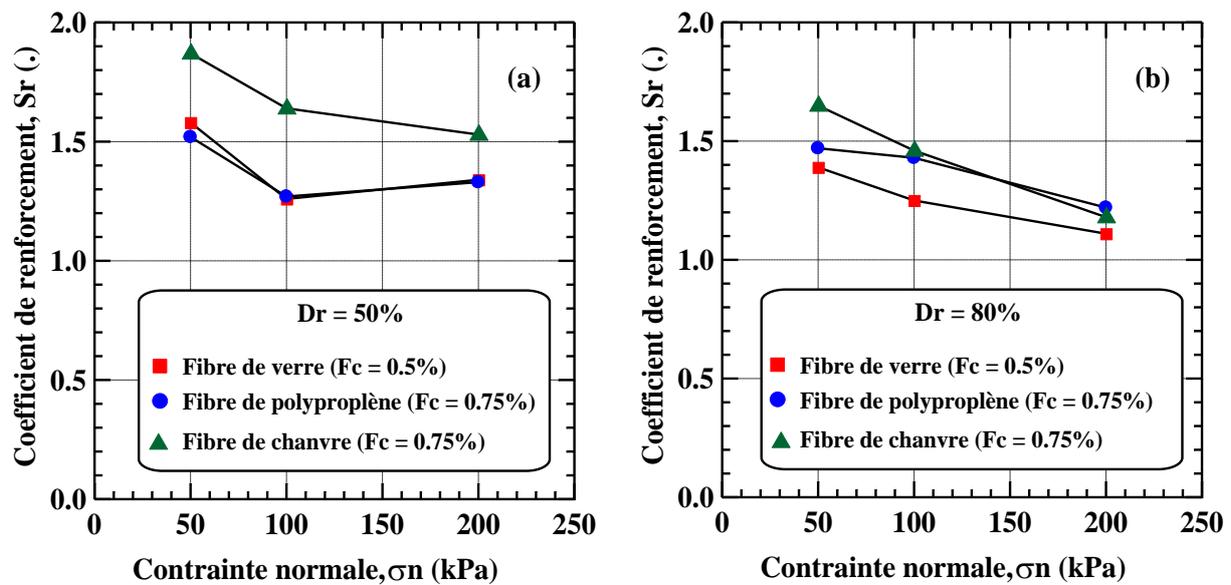
La figure 4.15 montre la variation de l'angle de frottement en fonction de la teneur en fibres pour trois types de fibres différents (Figure 4.15a et 4.15b), à l'état moyennement dense et dense. Les résultats indiquent qu'il existe une augmentation significative de l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) avec l'augmentation de la teneur en fibres, que ce soit à l'état moyennement dense ou à l'état dense avec les trois types de fibres utilisés. À cet effet, nous avons noté que pour le sable moyennement dense, les valeurs de l'angle de frottement fluctuent entre  $29.91^\circ$  pour le sable non renforcé à  $42.46^\circ$  pour le sable renforcé par fibres de verre à une teneur optimale ( $F_c = 0.5\%$ ), pour le deuxième type (fibres de polypropylène), l'angle de frottement passe jusqu'à  $44.57^\circ$  et jusqu'à  $46.01^\circ$  pour le troisième type de fibres (chanvre) pour des teneurs en fibre optimales ( $F_c = 0.75\%$ ). Cependant, les valeurs de l'angle de frottement enregistrées pour le sable de Chlef à l'état dense variant entre  $42.06^\circ$  pour le sable non renforcé jusqu'à  $48.61^\circ$  pour le sable renforcé par fibres de verre;  $49.96^\circ$  pour le sable renforcé fibres de polypropylène et jusqu'à  $49.29^\circ$  pour le sable renforcé par fibres de chanvre pour des pourcentages en fibres optimaux  $F_c = 0.5\%$ ,  $0.75\%$  et  $0.75\%$ , respectivement.



**Figure 4.15:** Evolution de l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) en fonction du type de fibre pour des échantillons renforcés par fibres, (a) état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (b) état dense ( $D_r = 80\%$ ).

#### 4.11. Effet du type de fibre sur le coefficient de renforcement ( $S_r$ )

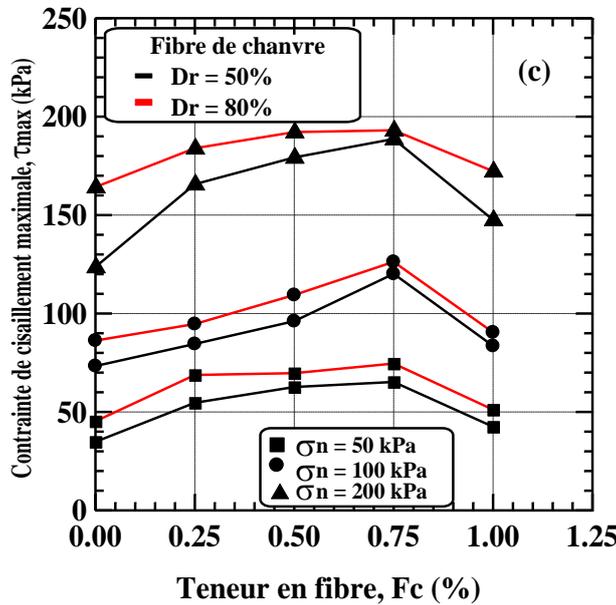
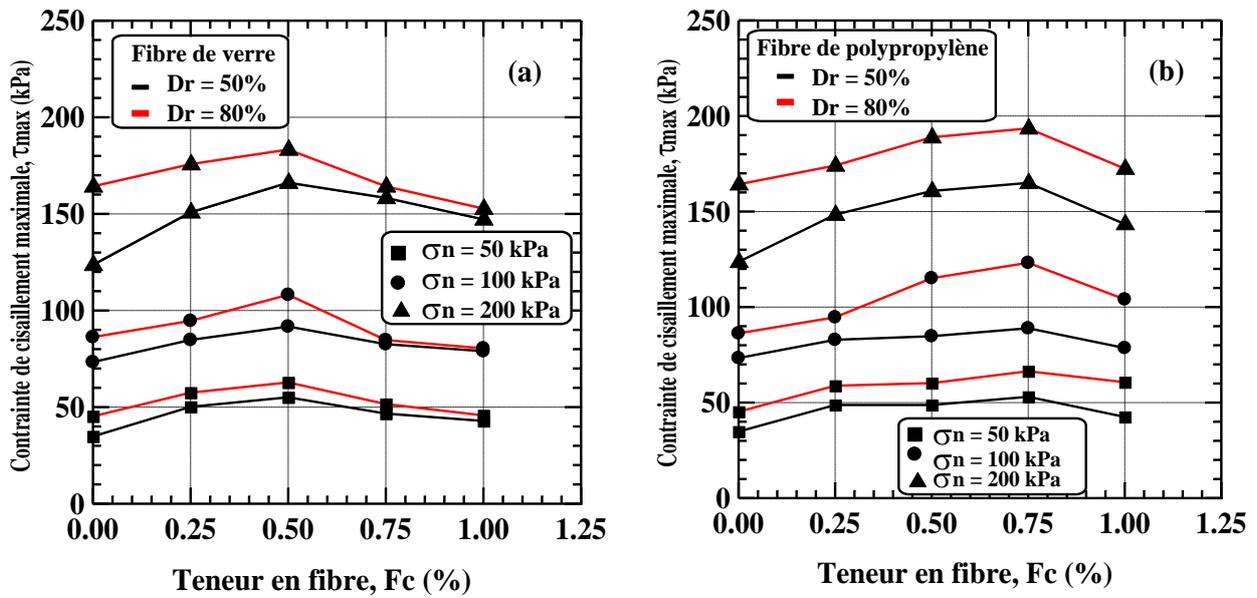
La figure 4.16 montre la variation du rapport de résistance au cisaillement pour le sable renforcé au sable non renforcé à l'état moyennement dense et dense sous différentes contraintes normales ( $\sigma_n = 50, 100, 200$  kPa). A un état moyennement dense (Figure 4.16a), on constate un écart important des valeurs du rapport de résistance au cisaillement pour les échantillons renforcés par fibres de chanvre comparé à ceux des échantillons renforcés par fibres de verre ou par fibres de polypropylène. Les valeurs du rapport de résistance au cisaillement ( $S_r$ ) enregistrés pour le premier type de fibres (fibres de verre) enregistrent les valeurs suivantes 1.58, 1.26 et 1.34; pour le deuxième type de fibre (fibre de polypropylène) les valeurs de ( $S_r$ ) enregistrent des valeurs de 1.52, 1.27 et 1.33; enfin pour le dernier type de fibres (fibres de chanvre) les valeurs de ( $S_r$ ) atteintes sont 1.87, 1.64 et 1.53 pour des contraintes normales ( $\sigma_n = 50, 100$  et  $200$  kPa), respectivement. Dans le cas d'un état dense (Figure 4.16b), on note que l'écart des valeurs du rapport de résistance au cisaillement pour les échantillons renforcés par fibres de chanvre comparé à celles des échantillons renforcés par d'autres fibres et moins importants, ou on constate que les valeurs du rapport de cisaillement des échantillons renforcés par fibres de polypropylène avoisine ces dernières.



**Figure 4.16:** Evolution du coefficient de renforcement ( $S_r$ ) du type de fibre pour des échantillons renforcés par fibres, (a) état moyennement dense ( $D_r = 50\%$ ), (b) état dense ( $D_r = 80\%$ ).

#### 4.12. Effet de la contrainte normale ( $\sigma_n$ ) et de la densité relative ( $D_r$ )

La figure 4.17 illustre la variation de la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) en fonction de la teneur en fibres  $F_c$  (%) des échantillons non renforcés et renforcés du sable de Chlef sous trois contraintes normales ( $\sigma_n = 50, 100$  et  $200$  kPa) à un état de densité relative moyen ( $D_r = 50\%$ ) et dense ( $D_r = 80\%$ ) pour trois types de fibres différents. On constate à cet effet une augmentation significative de la résistance au cisaillement avec l'augmentation de la densité relative et de la contrainte normale. Ce développement est logique car le mécanisme du renforcement par fibres est purement frictionnel, une augmentation de la densité relative ou de la contrainte normale rapproche les grains de sable et les inclusions de fibres entre eux ce qui donne une surface de contact interfaciales plus importantes donnant place à plus de frottement, de déformation plastique et de la rugosité des fibres ce qui a son tour augmente la résistance du matériau composite (Liu et al. 2011). Ces résultats sont en accord avec ceux de Parakar et Sridhar (2002).



(c) Fibre de chanvre

**Figure 4.17:** Variation de la contrainte de cisaillement maximale ( $\tau_{max}$ ) en fonction de la teneur en fibre  $F_c$  (%) des échantillons non renforcés et renforcés du sable de Chlef sous trois contraintes normales ( $\sigma_n = 50, 100$  et  $200$  kPa) à un état de densité relative moyen ( $D_r = 50\%$ ) et dense ( $D_r = 80\%$ ) pour trois types de fibres différentes, (a) fibre de verre, (b) fibre de polypropylène, (c) fibre de chanvre.

#### **4.13. Conclusion**

Les résultats de cette étude ont montré que l'inclusion de fibres naturelles et synthétique fournit une amélioration de la résistance au cisaillement ainsi que les caractéristiques mécaniques intrinsèques (cohésion et angle de frottement interne) du sable renforcé par rapport au sable non renforcé. Nos résultats sont parfaitement en accord avec ceux obtenus dans la littérature (Benessalah et al. 2015 et Bouaricha et al. 2017).

La teneur en fibres joue un rôle majeur dans l'amélioration des propriétés du sol de Chlef renforcé. La résistance au cisaillement ainsi que les caractéristiques mécaniques intrinsèques (cohésion et angle de frottement interne) du sable renforcé augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à une teneur optimale propre à chaque type de fibres. Par conséquent, l'investigation d'une teneur en fibres optimale est indispensable dans la composition d'un sol renforcé par fibres distribuées de façon aléatoire. En même temps, l'introduction de fibres limite la dilatance du sol, aussi l'augmentation du pourcentage de fibres amplifie le caractère contractant du sol.

Aussi, il est clair que la densité relative et la contrainte normale ont une influence quasi-similaire sur le comportement des sols renforcés par fibres distribuées aléatoirement, où on remarque qu'une augmentation de ces derniers augmente les caractéristiques mécaniques du sol renforcé. Cependant, ces dernières diminuent l'influence du renforcement sur l'amélioration des caractéristiques physiques des sols renforcés.

## *Conclusion générale et perspectives*

## 1. Objectif du travail

Le présent travail s'est fixé comme objectif, l'amélioration des sols granulaires par des fibres synthétiques et naturelles. Il a été réalisé dans le but de bien comprendre le comportement mécanique du sable de Chlef renforcé par des fibres de polypropylène, de verre et de chanvre. Pour cela, un programme d'essais de cisaillement à la boîte de Casagrande au laboratoire ont été réalisés sur des échantillons reconstitués du sable de Chlef non renforcés et renforcés par des pourcentages de fibres  $F_c = 0, 0.25, 0.5, 0.75$  et  $1\%$ , préparés à deux états de densité, moyennement dense et dense, sous trois contraintes normales  $\sigma_n = 50, 100$  et  $200$  kPa. Cette étude nous a permis d'analyser les effets de certains paramètres tels l'ajout de fibres, le teneur en fibre, le type de fibre, la densité relative, et la contrainte normale appliquée.

Nous avons été amenés, à l'issue de cette recherche, à formuler certaines conclusions et à entrevoir des pistes de recherche qui gagnent à être approfondies dans des travaux futurs. Les principales conclusions générales découlant de ces travaux sont les suivantes:

## 2. Principaux résultats obtenus

Les résultats des essais de comportement mécanique sur les sables moyennement denses et denses ont montré une amélioration de la résistance au cisaillement avec l'augmentation du pourcentage des fibres. Cependant, il existe une teneur en fibre optimale pour chaque type de fibre, qui une fois dépassée, l'inclusion en fibre influe négativement sur le comportement du composite sol-fibre. Selon les résultats trouvés, il est à noter que les valeurs de la cohésion ( $C$ ) et de l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) augmentent avec l'augmentation du pourcentage de fibres et montrent un maximum pour un taux de  $F_c = 0.5, 0.75\%$  et  $0.75\%$  pour des fibres de verre, polypropylène et de chanvre, respectivement.

Il est aussi à noter que l'efficacité du renforcement est fortement influencée par la contrainte normale appliquée et l'état de densité de l'échantillon. La variation du coefficient de renforcement ( $S_r$ ) a révélé une efficacité plus importante du renforcement pour la densité relative moyenne ( $D_r = 50\%$ ) par rapport à celle du cas dense ( $D_r = 80\%$ ). Il a été déduit, au vu de ces constatations que le renforcement fonctionne considérablement dans les échantillons du sol les plus instables (une densité relative et un niveau de contrainte faible). Cela est dû à l'effet de la contrainte normale qui engendre une amplification de la phase de contractance du sable non renforcé et renforcé.

### **3. Perspectives**

En perspective, étant donné que la région de Chlef est une région connue par sa sismicité, il serait intéressant de réaliser une série d'essais à l'appareil triaxial monotone et cyclique pour étudier la performance du sable de Chlef non renforcé et renforcé par fibre aléatoirement distribuée à la liquéfaction cyclique « liquéfaction vraie », ainsi que l'influence des propriétés physiques et rhéologiques des fibres sur celle-ci.

Le développement d'un modèle de prédiction et/ou de simulation du comportement à la liquéfaction du sable de Chlef renforcé par fibre à partir des résultats expérimentaux et des modèles de calcul existant dans la littérature est une piste intéressante à approfondir.

## *Références bibliographiques*

## Références bibliographiques

- Dhouib A. (2003) :** Procédés et techniques d'amélioration des sols : état des connaissances et développements actuels. TPTECH, Paris 2003
- Dembicki E, Kisielowa N. (1983):** Technology of soil compaction by means of explosion.
- Boutouil M., Levacher D. (2000) :** Traitement et valorisation des vases de dragages par solidification/stabilisation.
- Walid Zoubir (2009) :** MEMOIRE DE RECHERCHE de Magistère « Effet des résidus minéraux sur l'amélioration des sols argileux de la région de chlef » page 27
- Jean-Pierre Magnan et Georges Pilot(2014) :** Amélioration des sols. Technique de l'ingénieur.
- W.delleur, Jacques. (1998) :** The handbook of ground water engineering.
- Bulletin Cftr-info. (2002) :** Le traitement des sols
- Thomas, F., Schmidt-Rhaesa, A., Martin, G., Manu, C., Durand, P., Renaud, F. (2002).** Do hairworms (Nematomorpha) manipulate the water seeking behaviour of their terrestrial hosts. *Journal of Evolutionary Biology*. Volume 35, Issue 2.
- Haofeng, C., Peter, L. Morrel, D., Toleno, M., Karen, E., Lundy, M., Clegg, T. (2009).** Allele-specific PCR can improve the efficiency of experimental resolution of heterozygotes in resequencing studies. *Molecular Ecology Resources Journal*. Volume 10, Issue 4, pages 647-658.
- Zalihe Nalbantoglu (2002).** Utilization of an industrial waste in calcareous expansive clay stabilization. *Geotechnical Testing Journal* 25(1).
- Kumar Mehta, P., Malhotra, V.M. (1996).** Pozzolanic and cementitious materials. *Advances in concrete technology*, Volume. 1.
- Asavapisit, S., Nanthamontry, W., Polprasert, C. (2001).** Influence of condensed silica fume on the properties of cement-based solidified wastes. *Cement and Concrete Research*. Volume 31, Issue 8, Pages 1147-1152.
- Vessely, Mark J., and Jonathan T. H. Wu. (2002).** Feasibility of Geosynthetic Inclusion for Reducing Swelling of Expansive Soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1787, no. 1: 42–52. doi:10.3141/1787-05.
- Ikizler, S. B., M. Aytakin, and M. Vekli. (2009).** Reductions in Swelling Pressure of Expansive Soil Stabilized Using EPS Geofom and Sand. *Geosynthetics International* 16, no. 3: 216–221. doi:10.1680/gein.2009.16.3.216.
- Viswanadham, B.V.S., B.R. Phanikumar, and R.V. Mukherjee. (2009).** Effect of Polypropylene Tape Fibre Reinforcement on Swelling Behaviour of an Expansive Soil.” *Geosynthetics International* 16, no. 5: 393–401. doi:10.1680/gein.2009.16.5.393.

- Zollo, L.J., Richard, G., Heimberg, R., Becker, E. (1985).** Evaluations and consequences of assertive behavior. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*. Volume 16, Issue 4, Pages 295-301.
- Jenck, O et al. (2001).** Risques géotechniques sur les ouvrages de génie civil et industriel.
- Liausou P., Pezot B. (2001).** Renforcement de sols mous par colonnes à module contrôlé. *Proc. 15th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, vol.2, 1613-1618.*
- Briançon, L., Nancey, A., Villard, P., Voet, M. (2004).** Geodetect: Un système d'alerte et de prévention des effondrements souterrains. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Lille 28 - 30 juin.*
- Bell, T. J., and James A. Quinn. (1987).** Effects of soil moisture and light intensity on the chasmogamous and cleistogamous components of reproductive effort of *Dichanthelium clandestinum* populations. *Canadian Journal of Botany*. Volume 65, Number 11.
- Combarieu, O., Gestin, F., Pioline, M. (1994).** Remblais sur sols améliorés par inclusions rigides-Premiers chantiers. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*. N° 191, pages 55-62.
- Wu, T. H., McOmber, R. M., Erb, R. T., & Beal, P. E. (1988).** Study of soil-root interaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(12), 1351-1375.
- Greenwood, J. R. (2006).** SLIP4EX—A program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement and hydrological changes. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24(3), 449-465.
- Greenwood, J. R., Norris, J. E., & Wint, J. (2004).** Assessing the contribution of vegetation to slope stability. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 157(4), 199-207.
- Jamshidi, R., Towhata, I., Ghiassian, H., & Tabarsa, A. R. (2010).** Experimental evaluation of dynamic deformation characteristics of sheet pile retaining walls with fiber reinforced backfill. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(6), 438-446.
- Ghiassian, H., Jamshidi, R., & Tabarsa, A. R. (2008).** Dynamic performance of Toyoura sand reinforced with randomly distributed carpet waste strips. In *Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics IV* (pp. 1-13).
- Abtahi, M., Ebadi Ahsan, F., Hejazi, S. M., & Sheikhzadeh, M. (2008).** On the use of textile fibers to achieve mechanical soil stabilization. In *4th International Textile, Clothing & Design Conference—Magic World of Textiles*.
- Frost, J. D., & Han, J. (1999).** Behavior of interfaces between fiber-reinforced polymers and sands. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 125(8), 633-640.

- Tagnit-Hamou, A., Vanhove, Y., & Petrov, N. (2005).** Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes. *Cement and concrete research*, 35(2), 364-370.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., & Cai, Y. (2007).** Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202.
- Bordoloi, S., Garg, A., & Sekharan, S. (2017).** A review of physio-biochemical properties of natural fibers and their application in soil reinforcement. *Advances in Civil Engineering Materials*, 6(1), 323-359.
- Zakikhani, P., Zahari, R., Sultan, M. T. H., & Majid, D. L. (2014).** Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites. *Materials & Design*, 63, 820-828.
- Sathishkumar, T. P., Naveen, J. A., & Satheeshkumar, S. (2014).** Hybrid fiber reinforced polymer composites—a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(5), 454-471.
- Bordoloi, S., Garg, A., & Sekharan, S. (2017).** A review of physio-biochemical properties of natural fibers and their application in soil reinforcement. *Advances in Civil Engineering Materials*, 6(1), 323-359.
- Bordoloi, S., Hussain, R., Garg, A., Sreedeeep, S., & Zhou, W. H. (2017).** Infiltration characteristics of natural fiber reinforced soil. *Transportation Geotechnics*, 12, 37-44.
- Nilsson, L. (1975).** Reinforcement of concrete with sisal and other vegetable fibres. NASA STI/Recon Technical Report N, 76, 30405.
- Kishore, J., & Rao, K. (1986).** Moisture absorption characteristics of natural fiber composites. *J Reinf Plast Compos*, 5, 141-50.
- Ghavami, K., Toledo Filho, R. D., & Barbosa, N. P. (1999).** Behaviour of composite soil reinforced with natural fibers. *Cement and Concrete Composites*, 21(1), 39-48.
- Rowell, R. M. (2000).** Characterization and factors effecting fiber properties. *Natural polymers and agrofibers based composites*.
- Savastano Jr, H., Warden, P. G., & Coutts, R. S. P. (2000).** Brazilian waste fibers as reinforcement for cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 22(5), 379-384.
- Ravishankar, U., & Raghavan, S. (2004, December).** Coir stabilised lateritic soil for pavements. In *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference, Ahmed abad, India* (pp. 45-52).
- Aggarwal, P., & Sharma, B. (2010).** Application of jute fiber in the improvement of subgrade characteristics. *International journal on transportation and urban development*, 1(1), 56-58.
- Al Adili, A., Azzam, R., Spagnoli, G., & Schrader, J. (2012).** Strength of soil reinforced with fiber materials (Papyrus). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 48(6), 241-247.

- Kar, R. K., Pradhan, P. K., & Naik, A. (2014).** Effect of randomly distributed coir fibers on strength characteristics of cohesive soil. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19, 1567-1583.
- Wang, Y. (Ed.). (2006).** Recycling in textiles. Woodhead publishing.
- Al-Refeai, T. O. (1991).** Behavior of granular soil reinforced with discrete randomly oriented inclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, 10(4), 319–333.
- Maher, H., Gray, H., (1990),** “Static response of sand reinforced with randomly distributed fibers”, *J Geotech Eng ASCE*, 116, 1661–77.
- Gray, D. H., & Al-Refeai, T. (1986).** Behavior of fabric-versus fiber-reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(8), 804-820.
- Michalowski, R. L., & Čermák, J. (2003).** Triaxial compression of sand reinforced with fibers. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 129(2), 125-136.
- Michalowski, R. L. (1997).** Limit stress for granular composites reinforced with continuous filaments. *Journal of engineering mechanics*, 123(8), 852-859.
- Consoli, N. C., Casagrande, M. D. T., & Coop, M. R. (2007).** Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. *Géotechnique*, 57(9), 751-756.
- Bao, X., Jin, Z., Cui, H., Ye, G., & Tang, W. (2020).** Static liquefaction behavior of short discrete carbon fiber reinforced silty sand. *Geosynthetics International*, 27(6), 606-619.
- Parakar, J., & Sridhar, R. S. (2002).** Effect of random inclusion of sisal fiber on strength behaviour of soil. *Construction and Building materials*, 16(2), 123-131.
- Gray, D. H., & Ohashi, H. (1983).** Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of geotechnical engineering*, 109(3), 335-353.
- Maher, M. H., & Ho, Y. C. (1994).** Mechanical properties of kaolinite/fiber soil composite. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(8), 1381-1393.
- Santoni, R. L., Tingle, J. S., & Webster, S. L. (2001).** Engineering properties of sand-fiber mixtures for road construction. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(3), 258-268.
- Ranjan, G., Vasan, R. M., & Charan, H. D. (1996).** Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. *Journal of geotechnical engineering*, 122(6), 419-426.
- Consoli, N. C., Prietto, P. D. M., and Ulbrich, L. A., (1999),** “The behavior of a fiber reinforced cemented soil”, *Ground Improvement*, 3(1), 21-29.
- Consoli, N. C., Casagrande, M. D. T., & Coop, M. R. (2007).** Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. *Géotechnique*, 57(9), 751-756.

- Consoli, N. C., Casagrande, M. D., Prietto, P. D., and Thomé, A. N., (2003),** “Plate load test on fiber-reinforced soil”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(10), 951-955.
- Casagrande, M. D., Coop, M. R., & Consoli, N. C. (2006).** Behavior of a fiber-reinforced bentonite at large shear displacements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11), 1505-1508.
- Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2012).** Performance of fiber reinforced clayey sand composite. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 6(2), 147-152.
- Li, W., Chai, S. X., Zhang, H. Y., & Shi, Q. (2018).** Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber. *Construction and Building Materials*, 172, 300-308.
- Ramesh, H. N., Manoj Krishna, K. V., & Mamatha, H. V. (2010).** Compaction and strength behavior of lime-coir fiber treated Black Cotton soil. *Geomechanics & engineering*, 2(1), 19-28.
- Maher, M. H. (1988).** Static and dynamic force response of sands reinforced with discrete, randomly distributed fibers (Doctoral dissertation, University of Michigan).
- Wang, Z., Zhao, X. L., Xian, G., Wu, G., Raman, R. S., Al-Saadi, S., & Haque, A. (2017).** Long-term durability of basalt-and glass-fibre reinforced polymer (BFRP/GFRP) bars in seawater and sea sand concrete environment. *Construction and Building Materials*, 139, 467-489.
- Sharma, V., Vinayak, H. K., & Marwaha, B. M. (2015).** Enhancing compressive strength of soil using natural fibers. *Construction and Building Materials*, 93, 943-949.
- Bordoloi, S., Garg, A., & Sekharan, S. (2017).** A review of physio-biochemical properties of natural fibers and their application in soil reinforcement. *Advances in Civil Engineering Materials*, 6(1), 323-359.
- Bordoloi, S., Hussain, R., Garg, A., Sreedeeep, S., & Zhou, W. H. (2017).** Infiltration characteristics of natural fiber reinforced soil. *Transportation Geotechnics*, 12, 37-44.
- Gowthaman, S., Nakashima, K., & Kawasaki, S. (2018).** A state-of-the-art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: Past findings, present trends and future directions. *Materials*, 11(4), 553.
- Benessalah, I., Arab, A., Villard, P., Sadek, M., & Kadri, A. (2015).** Laboratory study on shear strength behaviour of reinforced sandy soil: effect of glass-fibre content and other parameters. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), 1343-1353.
- Liu, J., Wang, G., Kamai, T., Zhang, F., Yang, J., & Shi, B. (2011).** Static liquefaction behavior of saturated fiber-reinforced sand in undrained ring-shear tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(5), 462-471.

- Khebizi, W., Della, N., Denine, S., Canou, J., & Dupla, J. C. (2018).** Undrained behaviour of polypropylene fiber reinforced sandy soil under monotonic loading. *Geomechanics and Geoengineering*, 14(1), 30-40.
- Bouaricha, L., Henni, A. D., & Lancelot, L. (2017).** A laboratory investigation on shear strength behavior of sandy soil: effect of glass fiber and clinker residue content. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 39(4), 3-15.
- Tang, C. S., Shi, B., & Zhao, L. Z. (2010).** Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1), 54-62.
- Li, J., Tang, C., Wang, D., Pei, X., & Shi, B. (2014).** Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), 133-137.
- Jewell, R. A., & Wroth, C. P. (1987).** Direct shear tests on reinforced sand. *Geotechnique*, 37(1), 53-68.
- Palmeira, E. M., & Milligan, G. W. (1989).** Large scale direct shear tests on reinforced soil. *Soils and foundations*, 29(1), 18-30.
- Michalowski, R. L., (2008),** “Limit analysis with anisotropic fibre reinforced soil”, *Geotechnique* 58(6), 489–501.
- Ibraim, E., Diambra, A., Russell, A. R., Wood, D. M., (2012),** “Assessment of laboratory sample preparation for fibre reinforced sands”, *Geotext Geomembr* 34, 69–79.
- Freitag, D. R. (1986).** Soil randomly reinforced with fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(8), 823-826.
- Consoli, N. C., Prietto, P. D., and Ulbrich, L. A., (1998),** “Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(12), 1211-1214.
- Ibraim, E., & Fourmont, S. (2007).** Behaviour of sand reinforced with fibres. In *Soil stress-strain behavior: Measurement, modeling and analysis* (pp. 807-818). Springer, Dordrecht.
- Michalowski, R. L., & Zhao, A. (1996).** Failure of fiber-reinforced granular soils. *Journal of geotechnical engineering*, 122(3), 226-234.
- Eskisar, T., Karakan, E., & Altun, S. (2016).** Effects of fibre reinforcement on liquefaction behaviour of poorly graded sands. *Procedia engineering*, 161, 538-542.
- Liang, L. (1995).** Development of an energy method for evaluating the liquefaction potential of a soil deposit (Doctoral dissertation, Case Western Reserve University).
- Baziar, M. H., & Jafarian, Y. (2007).** Assessment of liquefaction triggering using strain energy concept and ANN model: capacity energy. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(12), 1056-1072.

- Amini, P. F., & Noorzad, R. (2018).** Energy-based evaluation of liquefaction of fiber-reinforced sand using cyclic triaxial testing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104, 45-53.
- 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.
- Babu, G. S., Vasudevan, A. K., & Haldar, S. (2008).** Numerical simulation of fiber-reinforced sand behavior. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(2), 181-188.
- Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M., & Russell, A. R. (2010).** Fibre reinforced sands: experiments and modelling. *Geotextiles and geomembranes*, 28(3), 238-250.
- Yetimoglu, T., & Salbas, O. (2003).** A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *Geotextiles and Geomembranes*, 21(2), 103-110.
- Khattak, M. J., & Alrashidi, M. (2006).** Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil–cement mixtures. *The International Journal of Pavement Engineering*, 7(1), 53-62.
- Musenda, C. (1999).** Investigations on the effects of using discrete randomly distributed fiber reinforcement in expansive foundation soils. The University of Texas at Arlington.
- Puppala, A. J., & Musenda, C. (2000).** Effects of fiber reinforcement on strength and volume change in expansive soils. *Transportation Research Record*, 1736(1), 134-140.
- Vasudev, D. (2007).** Performance studies on rigid pavement sections built on stabilized sulfate soils.
- Mujah, D., Ahmad, F., Hazarika, H., and Safari, A., (2013),** “Evaluation of the mechanical properties of recycled glass fibers-derived three dimensional geomaterial for ground improvement”, *Journal of cleaner production*, 52, 495-503.
- Bouaricha, L., & Henni, A. D. (2019).** Combined Effect of Layers Number and the Glass Fiber Type on the Shear Strength Characteristics of Chlef sandy soil. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44(1), 107-114.
- Mattone, R. (2005).** Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in bahareque technique. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 611-616.
- Zhang, M. X., Javadi, A. A., & Min, X. (2006).** Triaxial tests of sand reinforced with 3D inclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(4), 201-209.
- Denine, S., Della, N., Dlawar, M. R., Sadok, F., Canou, J., & Dupla, J. C. (2016).** Effect of geotextile reinforcement on shear strength of sandy soil: laboratory study. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 38(4), 3-13.
- Shao, W., Cetin, B., Li, Y., Li, J., and Li, L. (2014).** Experimental investigation of mechanical properties of sands reinforced with discrete randomly distributed fiber”, *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(4), 901-910.