

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة حسيبة بن بوعلي - الشلف

Université Hassiba Benbouali –Chlef

كلية الهندسة المدنية و المعمارية

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

قسم الهندسة المدنية

Département de Génie-civil



Mémoire de Master

Filière:

Spécialité:

Présenté par

M^{ie} BECETTI Zaikha:

Thème

Etude du Comportement mécanique d'un Sable cimenté et traité partiellement par des déchets de brique en poudre et renforcé avec des fibres de polypropylène, Etude expérimentale

Application au sable de chlef

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

Dr. MRABET .K

Grade Université Hassiba Benbouali de Chlef Président

Pr. ARAB . A

Grade Université Hassiba Benbouali de Chlef Examineur

Pr. Della Nouredine

Grade Université Hassiba Benbouali de Chlef Encadrant

Promotion : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je remercie Dieu de m'avoir donné la force et la volonté d'achever mon travail.

Ce travail a été effectué au laboratoire de mécanique des sols de l'université Chlef.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude envers toutes les personnes et institutions qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à la réalisation de cette thèse.

Je remercie mon Directeur de thèse, Pr. N DELLA pour avoir accepté d'assumer le rôle de Directeur de ma thèse, pour sa précieuse guidance, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de cette recherche. Son expertise et sa patience ont été une source précieuse d'inspiration.

Je passe mes sincères remerciements au Drt. F.Z .CHAMMA doctorante à l'université de Chlef pour son précieux apport technique et sa contribution dans le développement et la mise au point des dispositifs expérimentaux. Sa disponibilité et ses conseils m'ont été d'une grande utilité.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury qui nous m'ont honorés d'avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

et l'ensemble des membres de l'équipe de recherche pour leurs remarques constructives, leur bienveillance, les discussions enrichissantes et les moments partagés ont largement contribué à l'avancement de ce projet.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants et personnel du département de génie civil de l'université de Chlef, particulier à mes professeurs Pr AMRI , Pr ARAB , Pr BELKHATIRE , Dr GHELIL , Dr FLITTI, Dr MEKKAKIA, Dr SADOUKI , Dr DELAL. Pour leur conseil avisé, leur disponibilité et leur soutien constant qui m'ont permis de mener à bien ce travail avec confiance et motivation.

Grace à votre savoir-faire et à votre bienveillance, J'ai pu approfondir mes compétences dans un environnement d'apprentissage enrichissant. Je vous en suis infiniment reconnaissante.

Un grand Merci au laboratoire de (MDS) pour m'avoir fourni les ressources nécessaires à la réalisation de mes expérimentations et analyse.

Enfin une pensée particulière pour mes amis et collègues de recherche pour votre soutien moral et votre bonne humeur, qui ont été essentiels dans les moments de doute et de fatigue.

DEDICACES

Je dédie ce travail à l'esprit de ma mère et mon père qui Dieu garde son âme - qui m'a soutenu tout au long de mon parcours, pour sa patience. Ils restent dans ma mémoire malgré l'amertume de la perte.

À mes frères et sœurs, Pour leur amour, leur soutien et leur présence réconfortante tout au long de cette aventure.

À ma belle-famille EBD ELHAK

A mon fils Mohamed Sedik

A ma fille Chahd

À tous mes amis, qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de mes études.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

DEDICACE

RESUME

ABSTRACT

ملخص

INTRODUCTION GENERALE	1
1.1 Introduction	4
1.2 Comportement mécanique des sables	4
1.3 Concepts Rhéologique des sables.....	5
1.4 La contractance et la dilatance des sols granulaire	5
1.5 Essais de comportement au cisaillement des sols au laboratoire	7
1.5.1 Essais à la boîte de cisaillement direct (Casagrande)	7
1.5.2 Essai à l'appareil triaxial.....	8
1.5.2.1 Comportement des sols sous chargement monotone	8
A- Essais Drainés.....	8
B- Essais non Drainés.....	9
1.6 Paramètres influant sur la résistance au cisaillement des sables	11
1.6.1 L'état de contrainte actuel	11
1.6.2 Influence de la densité relative.....	11
1.6.4 Influence de la saturation	17
1.6.5 Influence de la méthode de préparation	18
1.6.6 Le pré chargement	19
1.7 Conclusion.....	21
2.1 Introduction	23
2.2 Produits de cimentation	23
2.2.1 Liants hydrauliques	23

2.2.1.1 Ciment	23
2.2.1.2 Pouzzolane naturelle	25
2.2.1.3 Cendres volantes.....	26
2.2.1.4 Laitiers de hauts fourneaux.....	26
2.2.1.5 Dolomie.....	27
2.2.1.6 La chaux	28
2.3 Avantages du traitement.....	31
2.3.1 Avantages techniques.....	31
2.3.2 Avantages économiques	31
2.3.3 Avantages écologiques et environnementaux :	31
2.4 Différentes techniques de stabilisation des sols	31
2.5 Renforcement des sols par fibres	33
2.6 Différents type de fibres.....	35
2.6.1 Fibres artificielles synthétiques	35
2.6.1.1 Polyacrylamide (PAM)	35
2.6.1.2 Fibres de polypropylène (PP).....	36
2.6.1.3 Fibres de polyester (PE)	36
2.6.1.4 Fibres de verre.....	37
2.6.2 Fibres Naturelles	37
2.7 Paramètres influençant le comportement des sols renforcés par des fibres	40
2.7.1 L'effet des caractéristiques du sol.....	41
2.7.1.1 L'influence de la morphologie des grains	41
2.7.1.2 Effet de la taille des grains	41
2.7.2 L'effet des propriétés des fibres	43
2.7.2.1 L'effet de type des fibres.....	43
2.7.2.2 Effet de la teneur en fibres	46
2.7.2.3 Effet de la longueur des fibres.....	49
2.8 Applications de renforcement des sols par l'utilisation des fibres	50

2.9 Conclusion.....	52
3.1 Introduction	54
3.2. Matériaux utilisés	54
3.2.1. Sable de Chlef	54
3.2.2. Fibre de renforcement	56
3.2.3. Ciment	56
3.2.4. Poudre de brique	57
3.3. Préparation des échantillons	58
3.4. Essais de caractérisation des matériaux.....	59
3.4.1 Détermination de la masse volumique des grains solides d'un sol en utilisant la méthode du pycnomètre à eau	59
3.4.1.1. Principe de l'essai.....	59
3.4.1.2. Équipements nécessaires	59
3.4.1.3. Mode opératoire	60
3.4.2. Analyse granulométrique par tamisage	60
3.4.2.1. Équipements nécessaires	61
3.4.2.2. Mode opératoire	61
3.4.2.3. Expression des résultats.....	62
3.4.3. Détermination des masses volumiques sèches minimale et maximale des sables	62
3.4.3.1.Équipement nécessaire	62
3.4.3.2. Préparation de l'échantillon.....	63
3.4.3.3. Mode opératoire	63
3.4.3.3.1. Détermination de la masse volumique minimale	63
3.4.3.3.2. Détermination de la masse volumique maximale.....	64
3.5. Essai à la boîte de cisaillement	65
3.5.1. Principe de l'essai.....	65
3.5.2. Dispositif expérimental	65
3.5.3. Mode opératoire	66

3.5.4. Préparation des échantillons	67
3.6. Préparation des matériaux et mode opératoire.....	68
3.6. Conclusion	71
4.1. Introduction	73
4.2. Présentation et discussion des résultats	73
4.3. Effet de substitution	73
4.4. Effet de fibre de polypropylène.....	76
4.5. Effet de teneur en fibre sur la contractante et la dilatance.....	78
4.6. Effet de la contrainte normale	82
4.7. Conclusion.....	85
5.1. Etude paramétrique	87
5.1.1. Etude de l'influence de substitution par BWP	87
5.1.1.1. Résistance au cisaillement maximale	87
5.1.1.2. Résistance au cisaillement résiduelle.....	89
5.1.2. Indice de ductilité	91
5.1.3. La Cohésion et l'Angle de frottement	93
5.1.3.1. La Cohésion	93
5.1.3.2. Angle de frottement interne	95
5.1.4. Rapport d'amélioration	97
5.2 Conclusion.....	100
Conclusions Générales et Perspectives.....	102
REFERENCES	

RESUME

L'utilisation de matériaux recyclés, comme la poudre de brique rouge, et de renforts à base de fibres recyclées ou de fibres synthétiques comme le polypropylène, permet d'améliorer les propriétés du sol, selon la portée ou la fonction de l'ouvrage. Ces matériaux et déchets représentent une alternative intéressante d'un point de vue environnemental et technique. L'objectif de la recherche menée est de mettre en évidence l'effet de l'ajout de ciment, de poudre de brique rouge et de fibres de polypropylène sur le comportement mécanique des sols sableux (sables de la région de la vallée de Chlef) qui ont connu de nombreux phénomènes d'instabilité lors du tremblement de terre de Chlef en 1980 après JC, et de connaître la teneur en ciment, en poudre de brique rouge et en fibres à une certaine teneur en humidité qui commencera à contribuer à la contrainte de cisaillement.

Une étude expérimentale a été menée pour étudier le comportement d'un sol sableux, pour des échantillons traités avec différents ratios de ciment (2,5, 5, 10 %).

De la poudre de brique rouge a été préparée dans un rapport de 8/1 de ciment et de matière non renforcée, à teneur en humidité constante. Elle a été comparée à des échantillons traités avec les mêmes proportions de ciment et de brique rouge, de teneur en humidité et de renforcement avec différentes proportions de fibres de polypropylène (0,1, 0,2, 0,3), sous différentes contraintes normales de confinement (50, 100, 200 kPa).

En général, il semble que l'ajout de fibres améliore la résistance au cisaillement en réduisant le retrait du sol, tandis que l'ajout de ciment et de poudre de brique rouge augmente la résistance à la compression. Au-delà d'une certaine teneur en fibres, la résistance mécanique commence à diminuer.

Mots-clés : Sable, Déchets de briques rouges, Fibres de polypropylène, Comportement mécanique

ABSTRACT

The use of recycled materials, such as red brick powder, and reinforcement based on recycled fibers or synthetic fibers such as polypropylene, makes it possible to improve soil properties, depending on the scope or function of the structure. These materials and waste represent an interesting alternative from an environmental and technical standpoint.

The aim of the research conducted is to highlight the effect of adding cement, red brick powder and polypropylene fibers on the mechanical behavior of sandy soil (sands from the Chlef Valley region) that witnessed many instability phenomena during the Chlef earthquake in 1980 AD, and to know the content of cement, red brick powder and fibers at a certain moisture content that will start to contribute to shear stress.

An experimental study was conducted to study the behavior of sandy soil, for samples treated with different cement ratios (2.5, 5, and 10) %.

Red brick powder was prepared at a ratio of 8/1 of cement and non-reinforced, with a constant moisture content. It was compared with samples treated with the same different proportions of cement and red brick, moisture content and reinforcement with different proportions of polypropylene fibers (0.1, 0.2, 0.3), under different confining pressures (50, 100, 200 kPa).

In general, it appears that adding fiber improves shear strength by reducing soil shrinkage, while adding cement and red brick powder increases compressive strength. Above a certain fiber content, mechanical strength begins to decline.

Keywords : Sand, Red Brick Waste, Polypropylene Fibers, Mechanical Behavior

ملخص

إن استخدام تقنيات المعالجة بالمواد المعاد رسكلتها, من نفايات البناء كمسحوق الأجر الأحمر و التعزيز القائم على الألياف المعاد تدويرها أو الألياف الاصطناعية ك البوليبروبيلان .يجعل من الممكن تحسين خصائص التربة, اعتمادا على مجال أو وظيفة الهيكل, إذ تمثل هذه المواد و النفايات بديلا مثيرا للاهتمام من الناحية البيئية و التقنية.

الهدف من البحث الذي تم إجراؤه هو تسليط الضوء على تأثير إضافة الإسمنت و مسحوق الأجر الأحمر و ألياف البوليبروبيلان على السلوك الميكانيكي على التربة الرملية (رمال من منطقة وادي شلف) التي شهدت العديد من ظواهر عدم الاستقرار خلال زلزال الشلف سنة 1980 م , و معرفة محتوى الإسمنت و مسحوق الأجر الأحمر و الألياف بمحتوى رطوبي معين الذي سيبدأ في المساهمة في إجهاد القص .

أجريت دراسة تجريبية لدراسة سلوك التربة الرملية, لعينات معالجة بنسب مختلفة من الإسمنت و مسحوق الأجر الأحمر (2,5 . 5 . 10) %.

حيث يمثل مسحوق الأجر الأحمر نسبة 8 / 1. وكذلك العينات الغير المقويات .بمحتوى رطوبي ثابت و تم مقارنتها بعينات معالجة بنفس النسب المختلفة من الإسمنت و الأجر الأحمر و المحتوى الرطوبي و المقويات بنسب مختلفة من الياف البوليبروبيلان (0,1 . 0,2 . 0,3) , تحت ضغوط حصر مختلفة (50, 100, 200 كيلوباسكال).

تظهر بشكل عام أن إضافة الألياف تحسن من قوة القص ,عن طريق الحد من تقلص التربة و إضافة الإسمنت و مسحوق القرميد الأحمر يزيد من قوة الانضغاطية . عند محتوى معين من الألياف تبدأ القوة الميكانيكية من الانخفاض فوقه. الكلمات الافتتاحية : الرمل , نفايات الأجر الأحمر , ألياف البوليبروبيلان, السلوك الميكانيكي.

CHAPITRE I

Figure 1. 1: Propriétés Typique de résistance au cisaillement du sable

Figure 1. 2: Essai triaxial sur un sable, lâche ou dense ([Dano, 2001](#))

Figure 1. 3: Comportement mécanique de sables dense et lâche : a) essai drainé, b) essai non drainé. ([Benziane, 2021](#))

Figure 1.4: Principe d'un essai de cisaillement direct ([Casagrande, 1975](#)).

Figure 1.5: Essais triaxiaux monotones drainés sur sable lâche de Sacramento ([Lee, 1965](#)).

Figure 1.6: Essais triaxiaux monotones drainés sur sable dense de Sacramento ([Lee, 1965](#)).

Figure 1.7: Essais triaxiaux monotones non drainés (A, B et C) et drainé (D) sur sable ([Casagrande 1975](#)).

Figure 1. 8: Etat de contrainte initial d'un élément de sol au repos

Figure 1.9: Influence de l'indice des vides sur le comportement monotone non drainé du sable de Toyoura ([Verdugo 1992](#))

Figure 1. 10: L'effet de l'indice des vides sur la résistance au cisaillement cyclique ([Lee and Seed 1967](#))

Figure 1.11: Effet de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction du sable de Chlef ([Ahmed Arab, 2009](#))

Figure 1.12: Schématisation de la densification après le cisaillement de la structure d'après ([Lade & Yamamuro, 1997](#)).

Figure 1.13: L'influence de la teneur des fines sur le comportement non drainé d'un mélange sable-limon ([Arab, 2009](#))

Figure 1.14: Influence de la fraction des fines sur l'angle de frottement et l'angle caractéristique ([Arab, 2009](#))

Figure 1.15: Effet de fines peu plastiques sur la résistance à la liquéfaction cyclique ([Benghalia et al., 2015](#))

Figure 1. 16: Influence du coefficient de Skempton (B) sur le comportement non drainé du sable de Chlef ([Della et al., 2010](#))

Figure 1. 17: Courbes a) de la contrainte déviatorique $q(\epsilon_1)$ et b) de la déformation volumétrique $\epsilon_v(\epsilon_1)$ mesurées lors d'essais triaxiaux monotones drainés sur des échantillons lâche, moyennement denses et denses préparés par trois méthodes différentes (pluviation à l'air, pluviation à l'eau avec vibration ultérieure, damage humide en huit couches) ([Wichtmann et al., 2020](#))

Figure 1. 18: Influence d'un pré chargement cyclique sur résistance au cisaillement non drainé du mélange sable de Rass- limon SM (F10%, ID= 0,65) ([Arab et al, 2014](#))

CHAPITRE II

Figure2.1 Ciment.

Figure2.2 Pouzzolane naturelle.

Figure2.3 cendres volantes

Figure2.4 Laitiers de haut fourneau.

Figure2.5 Dolomie.

Figure 2.6 Chaux vive

Figure2.7 : Chaux éteinte.

Figure 2.8 : Lait de chaux

Figure 2.9 : Cycle de la chaux.

Figure 2. 10: Différentes méthodes de renforcement du sol

Figure 2. 11: Mécanisme de l'interaction sol-fibre

Figure 2. 12: Fibres synthétiques : (a) fibres de polypropylène (PP), (b) fibres de verre ([Sanjay Kumar Shukla, 2017](#))

Figure 2. 14: Classification des fibres naturelles selon ([Baley, 2004](#))

Figure 2. 15: Les fibres végétales (a) Fibre de sisal ([Hao et al., 2023](#)), (b) Fibre de Coir ([Kaushik & Singh, 2021](#))

Figure 2. 16: Fibres de basalte ([Zhang et al., 2023](#))

Figure 2. 17: Évolution de la granulométrie au cours de la compression isotrope à environ

50 MPa pour les échantillons de sable et de mélange fibres-sable ([Dos Santos et al., 2010](#)).

Figure 2. 18: Relation entre le rapport de contrainte et la déformation axiale pour toutes les teneurs en fibres et différentes densités relatives initiales. ([Ganiev et al., 2022](#))

Figure 2.1 9: Utilisation de géotextiles de jute pour le contrôle de l'érosion et la stabilisation des pentes (projet pratique réalisé au Vietnam, 2022-2023, photo fournie par FUCON). D'après (Nguyen & Indraratna, 2023)

Figure 2. 20: Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction de la teneur en matière plastique (Mir, 2020)

Figure 2. 21: Courbes contrainte-déformation : (a) Fibre de bagasse (b) Fibre de basalte (c) Fibre de polyester.(Ghasemi Nezhad & Tabarsa, 2023)

Figure 2. 22: Effet sur les fibres de la résistance au cisaillement d'une pression de confinement de 200 KPa et d'une densité relative élevée $Dr = 87\%$: (a) variation de la résistance au cisaillement en fonction de la forme de déformation horizontal du sable sec, (b) variation de la résistance au cisaillement en fonction de déformation horizontale avec une teneur en eau de l'échantillon $w = 3\%$. (Benessalah et al., 2016)

Figure 2. 23: Résistance au cisaillement du sable propre renforcé sous une contrainte de confinement de 100 KPa ($W = 3\%$), (a) contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal, (b) déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal(Aouali et al., 2019).

Figure 2. 24: L'effet de teneur en fibre de carbone sur la résistance au cisaillement (Gul et al., 2023)

Figure 2. 25: Relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation de cisaillement à différentes teneurs en fibres (Alhassani, 2021)

Figure 2. 26: Influence de la longueur des fibres sur le rapport de contrainte (paramètre de la ligne d'état critique).(Ganiev et al., 2022)

Figure 2. 27: Effet de la longueur des fibres sur la contrainte dévia torique pour a 50 KPa, b 100 KPa, et c 200 KPa. (Yazici & Keskin, 2024)

Figure 2. 28: Applications du sol renforcé par des fibres : (a) un mur de soutènement, (b) une semelle isolé, (c) un barrage de type « digue » (petit barrage construit en travers d'un bassin de rétention, d'une rigole ou d'un canal pour réduire la vitesse de l'écoulement).(Safdar et al., 2022)

CHAPITRE III

Figure 3.1 : Analyse granulométrique de sable de Chlef

Figure 3. 2 : a) Sable de Chlef ; b) Microscope électronique à balayage (SEM) Vue de sable

Figure 3.3 :Analyse granulométrique a laser dU ciment

Figure3.4 :granulométrie a laser de déchet de brique en poudre (BWP)

Figure 3.5 : Pycnomètre + Balance

Figure 3.6 : série de tamis

Figure 3.7 : Méthode de déposition du sable utilisée pour déterminer sa masse volumique minimale.

Figure 3.8 : Méthode de déposition du sable utilisée pour déterminer sa masse volumique maximale.

Figure 3.9: Boite de cisaillement direct utilisée

Figure 3.10: les deux demis boites utilisées

Figure 3.11 : Echantillon de mélange (sable+ciment+poudre de brique+fibre de polypropylène)

CHAPITRE IV

Figure 4.1.: Effet de substitution sur la résistance au cisaillement en fonction de la déformation horizontale avec un confinement de 50 kPa ; 100 kPa ; 200 kPa et une densité $D_r = 80\%$

Figure 4.2: Effet de substitution sur la déformation verticale en fonction de la déformation horizontale avec un confinement de 50 kPa ; 100 kPa ; 200 kPa et une densité $D_r = 80\%$

Figure 4.3: Effet de la teneur en fibres sur la résistance au cisaillement en fonction de la déformation horizontale avec un confinement de 50 kPa ; 100 kPa ; 200 kPa et une densité $D_r = 80\%$

Figure 4.4: Effet de la teneur en fibres sur la déformation verticale en fonction de la déformation horizontale avec un confinement de 50 kPa ; 100 kPa ; 200 kPa et une densité $D_r = 80\%$

CHAPITRE IV

Figure 4.5: courbes intrinsèques Evolution de la résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte normale : des échantillons renforcés et non renforcés

Figure4.6 : Effet de la contrainte normal sur la variation de la résistance au cisaillement en fonction du déplacement horizontal d`un sable traité et renforcé

CHAPITRE V

Figure 5.1 a ; 5.1 b et 5.1 c : Evolution de la résistance au cisaillement maximale en fonction des teneurs en substituants de Bwp et renforcement

Figure 5.2 a ; 5.2 b et 5.2 c: Evolution de la résistance résiduelle en fonction des teneurs en substituants de Bwp et renforcement

Figure 5.3 : Evolution de la cohésion en fonction des teneurs en substituants de Bwp.et teneurs en fibres de polypropylènes.

Figure 5.4: Evolution de l'angle de frottement en fonction des teneurs en substituants de Bwp.et teneurs en fibres de polypropylènes.

Figure 5.5a ; 5.5b et 5.5c : Evolution du rapport d'amélioration en fonction des teneurs en ciment et de substituants de Bwp et fibres

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau 01 : les paramètres utilisés dans l'essai triaxial

CHAPITRE II

Tableau 2.1 Différents types de ciments courants.

Tableau 2. 1 : Liste des fibres végétales avec leurs avantages et leurs applications

Tableau 2. 1 : Liste des fibres végétales avec leurs avantages et leurs applications

CHAPITRE III

Tableau 3. 1: Caractéristiques physiques du sable de Chlef

Tableau 3. 2 : Caractéristiques physico-mécaniques de la fibre de polypropylène

Tableau 3. 3 : Propriétés chimiques et minéralogiques du ciment.

Tableau 3.4 : propriétés physiques du ciment

Tableau 3.5 : propriétés physiques de la poudre de brique utilisée

Tableau 3.6 : programme expérimentale de traitement avec ciment et poudre de brique

Tableau 3.7 : programme expérimentale de renforcement avec fibres polypropylènes

CHAPITRE V

Tableau 5.1 : Résistance au cisaillement maximale en fonction des teneurs en ciment et de substituants de Bwp et teneurs en fibres.

Tableau 5.2 : Résistance au cisaillement maximale en fonction des teneurs en ciment et substitution de BWP

Tableau 5.3 : Résistance au cisaillement résiduelle en fonction des teneurs en ciment et de substituants de Bwp.

Tableau 5.4 : Indice de ductilité des échantillons cimentés en fonction des teneurs en ciment et de substituants de Bwp.

Tableau 5.5 récapitulation des résultats aux égards de la littérature.

Tableau 5.6 : Rapport d'amélioration en fonction des teneurs en substituants de Bwp et fibres de polypropylènes.

Liste des symboles

ϕ (°)	Angle de frottement
C [Kpa]	Cohésion
D50 [mm]	Diamètre moyen
δH [mm]	déplacement horizontale
δV [mm]	déplacement verticale
Cu (-)	Coefficient d'uniformité
Ccur (-)	Coefficient de courbure
e _{max} (-)	Indice des vides maximal
e _{min} (-)	Indice des vides minimal
γ_s [kN/m ³]	Poids volumique des grains solides
σ_N [Kpa]	Contrainte normale
τ [Kpa]	Résistance au cisaillement
τ_{max} [Kpa]	Résistance au cisaillement maximale
WC [%]	teneur en ciment
D10 [mm]	Diamètre efficace
Dr [%]	Densité relative initiale
wf %	Teneur en fibre
ϵ_h %	Déformation horizontal
ϵ_v %	Déformation volumique
D [mm]	Diamètre d'échantillon,
H [mm]	Hauteur d'échantillon
H/D [-]	Rapport de hauteur sur diamètre d'échantillon
M _s [g]	Masse d'échantillon
R ² [-]	Coefficient de corrélation
η_{res} [Kpa]	Résistance au cisaillement résiduelle
ΔU [Kpa]	Variation de pression interstitielle
IB :	Indice de ductilité
$\tau_{max T}$ [Kpa]	la résistance au cisaillement maximale du sable traité.
$\tau_{max nT}$ [Kpa]	la résistance au cisaillement maximale du sable non traité.
Sr	Rapport d'amélioration

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'instabilité des sols sableux présente un risque naturel qui constitue une menace dangereuse en raison de divers phénomènes naturels, tels que les séismes. Lorsqu'un sol sableux devient instable, il subit une perte de résistance et commence à s'écouler comme un liquide en raison de l'augmentation de la pression interstitielle. Ce phénomène a causé des dommages importants dans le monde en général, notamment lors des séismes de 1964 en Alaska et à Niigata, du séisme de Loma en 1989, du séisme de Northridge en 1994, du séisme de Chlef (El Asnam) en 1980 et plus récemment, du séisme de Boumerdes en 2003.

La problématique que nous souhaitons étudier fait partie des risques naturels, d'une part en raison de l'existence de sol présentant une sensibilité naturelle à ces risques, et d'autre part et surtout des solutions proposées pour minimiser l'effet de ce risque en améliorant ce sol par le traitement et le renforcement.

Le travail de recherche proposé est donc destiné à étudier en laboratoire l'influence de l'ajout de ciment et la poudre de brique renforts en fibres polypropylènes aléatoirement sur les caractéristiques mécaniques du sol, en étudiant le comportement du composite sol-renfort sous l'effet d'un certain nombre de paramètres.

Le présent travail concerne une étude expérimentale en laboratoire, sur le comportement d'un sable cimenté traité à la poudre de brique et renforcé par des fibres polypropylène.

Les travaux réalisés au cours de ce mémoire pour atteindre ces objectifs comprennent notamment des essais de cisaillement direct à la boîte sur le sable de chlef non renforcé et renforcé par des fibres recyclées, réalisés au niveau de laboratoire de mécanique des sols à l'université de Chlef.

Le contenu du mémoire comprend les parties suivantes :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur le comportement des sols granulaires, ainsi qu'une synthèse des différents travaux contenus dans la littérature sur les paramètres influençant le comportement des sols granulaires.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des caractéristiques physiques des différents types des matériaux de traitement et de renforcement, couvre ainsi le traitement par le ciment et la poudre de brique et le renforcement par les fibres polypropylène et les recherches associées.

Dans le troisième chapitre, il est présenté les caractéristiques physiques des matériaux utilisés, tel que le sable de Chlef, le ciment, la poudre de brique et les fibres. En plus du dispositif expérimental utilisé dans cette étude, ainsi que la description des procédures expérimentales et des protocoles des essais réalisés.

Le quatrième chapitre comprend les résultats des essais à la boîte de cisaillement direct. On montre en détail les résultats des essais réalisés sous la forme de graphes sur les échantillons du sol non renforcés et renforcés par fibres distribuées aléatoirement ainsi que l'influence de

Introduction générale

la teneur de fibre et certains nombres de paramètres comme : le contrainte normale et la densité relative sur le comportement mécanique du sol renforcé.

Le cinquième chapitre comporte les résultats d'une série d'essais de cisaillement dans le but d'étudier l'influence de teneur en poudre de brique et les fibres synthétiques sur la résistance maximale, la résistance résiduelle, l'angle de frottement, la cohésion .

Les résultats des essais réalisés sur les échantillons de sol non renforcés et renforcés par différents teneurs de fibres et traiter par différents teneurs de ciment et poudre de brique sont représentés par les courbes de variation du déviateur en fonction de déformation axiale

. Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale permettant de synthétiser les principaux résultats obtenus et d'envisager quelques perspectives.

CHAPITRE I : COMPORTEMENT MECANIQUE DES SABLES ET PARAMETRES INFLUENTS

1.1 Introduction

Comprendre le comportement du sol sous contrainte est primordial pour prévenir la rupture de la structure et déterminer les déformations engendrées par la contrainte appliquée. Le comportement mécanique d'un sol est principalement contrôlé par sa résistance au cisaillement. L'étude du comportement (contrainte-déformation) du sol permet de déterminer sa capacité portante sous les sollicitations causées par une structure ou par des phénomènes naturels tels qu'un séisme. Cette étude permet également d'identifier les paramètres qui influencent le comportement mécanique du sol.

1.2 Comportement mécanique des sables

Le comportement mécanique du sol sous chargement monotone ou cyclique présente des propriétés et des phénomènes variés. Ceci est principalement lié aux nombreux paramètres influençant la déformation du sol sous les effets des sollicitations extérieures. Les sols sableux présentent généralement certaines caractéristiques telles qu'une perméabilité élevée et une faible cohésion. leur comportement dans différentes conditions de chargement, y compris le chargement monotone ou cyclique, peut varier en fonction de certains facteurs tels que la taille des grains, la forme des particules, la teneur en eau et la pression de confinement. Lorsqu'il est soumis à une forte sollicitation, le sol sableux peut subir des phénomènes tels que la dilatation, la contractance, ainsi que des tassements. La compréhension du comportement mécanique des sols sableux est essentielle dans plusieurs applications d'ingénierie, y compris la conception des fondations, l'analyse de la stabilité des pentes et la construction des terrassements. Les propriétés de la résistance au cisaillement d'un sable peuvent être déterminées en utilisant des essais de cisaillement direct ou des essais triaxiaux. Néanmoins, dans les applications pratiques, seule la résistance drainée d'un sable est généralement significative. Les propriétés des sables secs et saturés sont identiques, en supposant qu'il n'y a pas de pression d'eau interstitielle supplémentaire dans le cas des sables saturés. Le graphique de la figure 1.1 présente la relation typique entre la contrainte de cisaillement et la déformation de cisaillement pour des échantillons de sable ayant différentes densités de départ dans des essais de cisaillement direct. La relation entre la différence de contrainte primaire et la déformation axiale dans les essais de compression triaxiale drainés donne des courbes similaires.

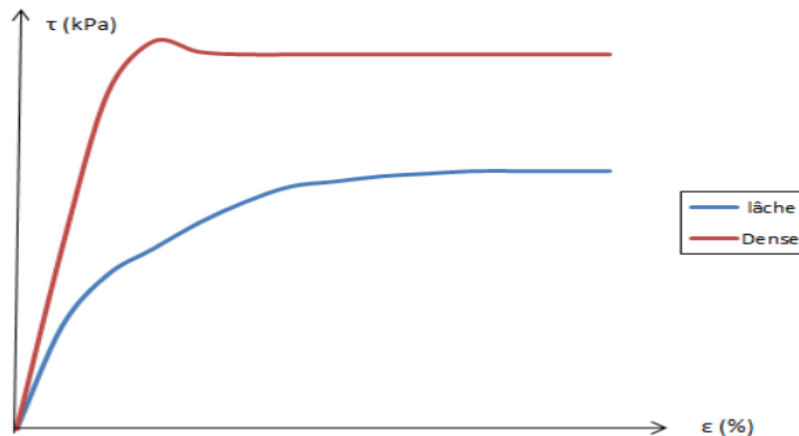


Figure 1.1: Propriétés Typique de résistance au cisaillement du sable

1.3 Concepts Rhéologique des sables

Les concepts rhéologiques des sables se réfèrent à l'étude du comportement des sables sous l'application de contraintes et de déformations, en particulier en ce qui concerne leurs propriétés de déformation. Les sables sont généralement considérés comme des matériaux granulaires, ils présentent néanmoins certaines caractéristiques rhéologiques, l'un des concepts essentiels de la rhéologie des sables est leur résistance au cisaillement, c'est-à-dire leur résistance à la déformation sous l'effet d'une contrainte de cisaillement. Les sables ont généralement une faible cohésion mais un frottement interne élevé, qui domine leur résistance au cisaillement. Cette résistance est influencée par des facteurs tels que la forme des grains, leur distribution granulométrique, leur angularité et leur disposition.

1.4 La contractance et la dilatance des sols granulaire

La contractance est la propriété du sol de diminuer de volume lorsqu'il est soumis à une augmentation de la contrainte effective. La contraction des sols sableux est principalement observée lorsque le sol est soumis à des conditions de chargement isotropes. Lorsque la contrainte est plus forte, les particules du sol se rapprochent les unes des autres, ce qui entraîne une réduction du volume. Il est très important de tenir compte de ce phénomène dans la phase de conception, en particulier dans les endroits où les changements de volume peuvent avoir un impact sur la stabilité et la performance des structures.

La dilatation se réfère à la propriété du sol d'augmenter de volume lorsqu'il subit une déformation par cisaillement tout en maintenant une contrainte effective constante, contrairement à la contraction. La dilatation est couramment observée dans les sols sableux lorsqu'une contrainte de cisaillement se produit, provoquant la recomposition des particules de

sol et permettant de créer des espaces entre elles. La compréhension de la dilatation est essentielle pour examiner la résistance au cisaillement et les propriétés de déformation des sols sableux, en particulier dans le contexte de la stabilité des pentes et de la conception des fondations.

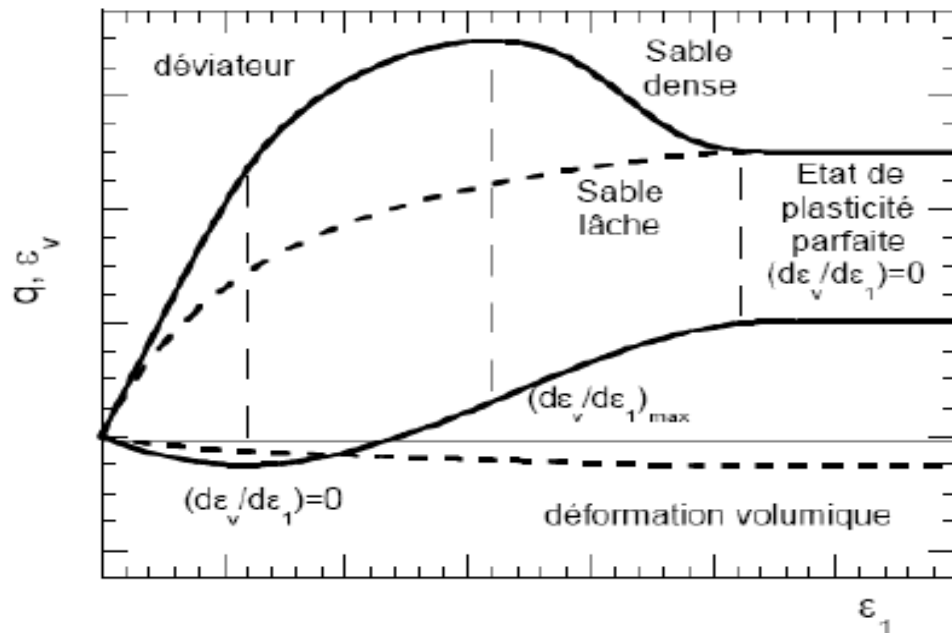


Figure 1.2: Essai triaxial sur un sable, lâche ou dense (Dano, 2001)

Le premier type de comportement que l'on rencontre en mécanique des sols est le comportement contractant. Ce comportement est observé dans les sables lâches, où il y a une diminution du volume du sol (figure 1.2). Ce changement de volume est dû à un mécanisme de densification qui se produit dans la masse granulaire (l'enchevêtrement des grains). Il résulte d'un glissement et d'un roulement entre les grains causés par des forces intergranulaires relativement élevées causées par la contrainte appliquée. Le deuxième type de comportement est le comportement dilatant. Contrairement au comportement de contraction, le comportement dilatant est observé dans les sables denses. Se caractérise par une augmentation du volume de sol soumis au cisaillement. Cette augmentation correspond à un mécanisme de désenchevêtrement et d'expansion de la structure granulaire. Dans la figure 1.3b, lorsque le sol n'est pas drainé, son comportement contractant et dilatant peut être observé à travers les changements de la pression interstitielle. Une augmentation de la pression interstitielle indique un comportement contractant, tandis qu'une diminution indique un comportement dilatant. Il est important de noter que la contractance ou la dilataance d'un sol

est directement lié à son état initial, en particulier à sa densité initiale et à son niveau de contrainte de consolidation.

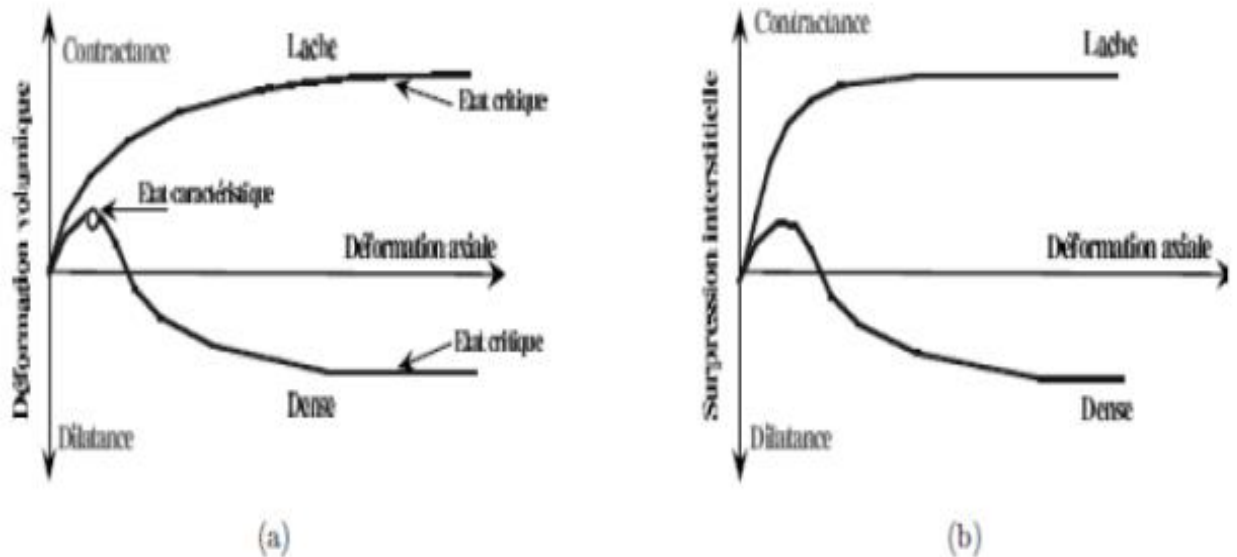


Figure 1.3: Comportement mécanique de sables dense et lâche. (Benziane, 2021)

1.5 Essais de comportement au cisaillement des sols au laboratoire

La résistance au cisaillement peut être déterminée soit par des essais in situ, soit par des essais en laboratoire. Elle est souvent estimée en laboratoire par des essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande où par des essais triaxiaux. L'utilisation de l'appareil triaxial nous permet d'obtenir des résultats plus détaillés et plus précis, et par la suite la possibilité de réaliser des chemins de contraintes particulières, et de contrôler les conditions d'essai où on peut réaliser des essais drainés ($\Delta u=0$) et non drainés ($\Delta e_v=0$) en compression ou en extension sous chargement monotone ou cyclique.

1.5.1 Essais à la boîte de cisaillement direct (Casagrande)

Les premiers types d'essais sont historiquement les essais de cisaillement direct (figure 1.4). Lors de cet essai, une contrainte verticale (dite contrainte normale) ainsi qu'un effort de cisaillement sont appliqués à l'échantillon. Les résistances au cisaillement des sols sont déterminées en utilisant l'approche rigide-plastique. En revanche, les tenseurs de contraintes et de déformations sont inconnus en raison de leur non uniformité et le volume ne peut plus être considéré comme homogène. Le «simple shear test» est une amélioration du dispositif à la boîte de cisaillement direct car les tenseurs de contraintes y sont uniformes.

Les dispositifs «ring shear» de cisaillement annulaire appartiennent également à cette

catégorie d'essais: le cisaillement est contrôlé par la torsion. L'intérêt principal de cet essai est de pouvoir suivre le comportement aux grandes déformations (plusieurs rotations sont possibles), et d'obtenir les valeurs de cisaillement résiduel qui interviennent, notamment dans les glissements de terrains, selon un plan de cisaillement prédéterminé.

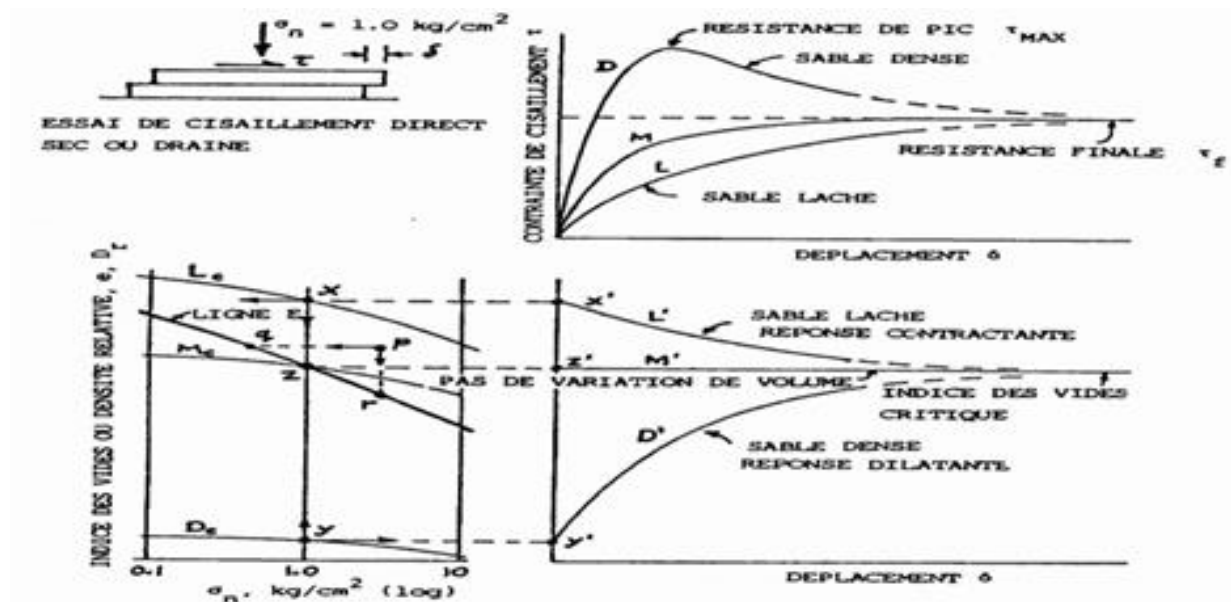


Figure 1.4: Principe d'un essai de cisaillement direct (Casagrande, 1975).

1.5.2 Essai à l'appareil triaxial

1.5.2.1 Comportement des sols sous chargement monotone

A- Essais Drainés

Lors d'un essai triaxial conventionnel où nous appliquons une contrainte $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ en compression monotone drainé, l'échantillon de sable verra initialement son volume diminuer lorsque la valeur du déviateur ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) augmente, c'est la phase de contractance. Cette dernière est le résultat de l'enchevêtrement des grains de sable. Pour un sable lâche la vitesse de déformation volumique tend lentement vers zéro. Par contre pour un sable dense la vitesse de déformation volumique s'annule rapidement et change de signe, alors le matériau devient dilatatant. Cette phase de dilatance est due essentiellement au désenchevêtrement des grains de sable. La phase de contractance et la phase de dilatance dépendent principalement de la densité du sable et de la pression de confinement (σ'_c). Les figures 1.5 et 1.6 établies par Lee (1965), mettent bien en évidence l'influence de la densité du sable et de la pression de confinement sur les variations du volume. En effet si nous observons sur l'une des deux

figures, nous remarquons que la phase de dilatance diminue et devient inexistante avec l'accroissement de la contrainte de confinement, et si nous comparons les deux figures, nous constatons pour un accroissement de la densité relative du sable, que les courbes de même pression de confinement subissent une diminution de la phase de contractance et au contraire une augmentation de la phase de dilatance.

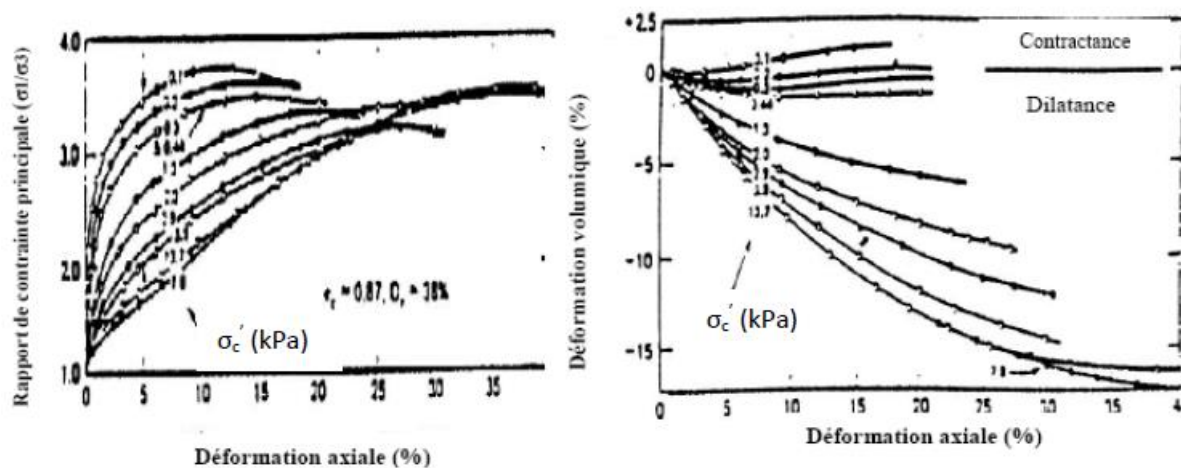


Figure 1.5: Essais triaxiaux monotones drainés sur sable lâche de Sacramento (Lee, 1965).

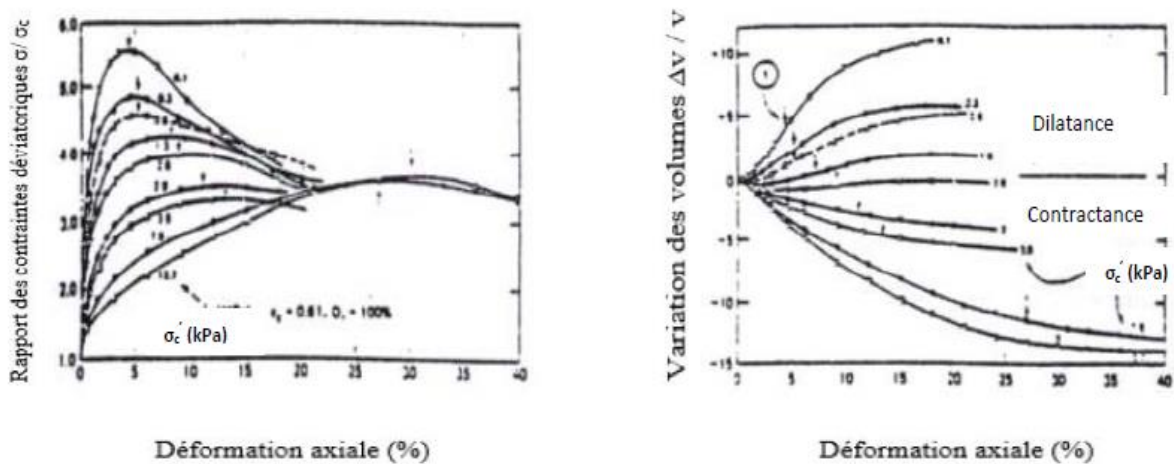


Figure 1.6: Essais triaxiaux monotones drainés sur sable dense de Sacramento (Lee, 1965).

B- Essais non Drainés

Lors d'un essai triaxial en compression monotone non drainée sur un échantillon de sable saturé, le volume de celui-ci reste constant, par contre la pression interstitielle varie au

cours de l'essai, de ce fait la phase de contractance et celle de dilatance peuvent être observées sur les variations de la pression interstitielle. La phase de contractance va se manifester par une augmentation de la pression interstitielle induite par une tendance à la densification du volume solide. Quant à la phase de dilatance, elle va se manifester par une diminution de la pression interstitielle engendrée par une tendance à l'augmentation du volume solide (figure 1.7).

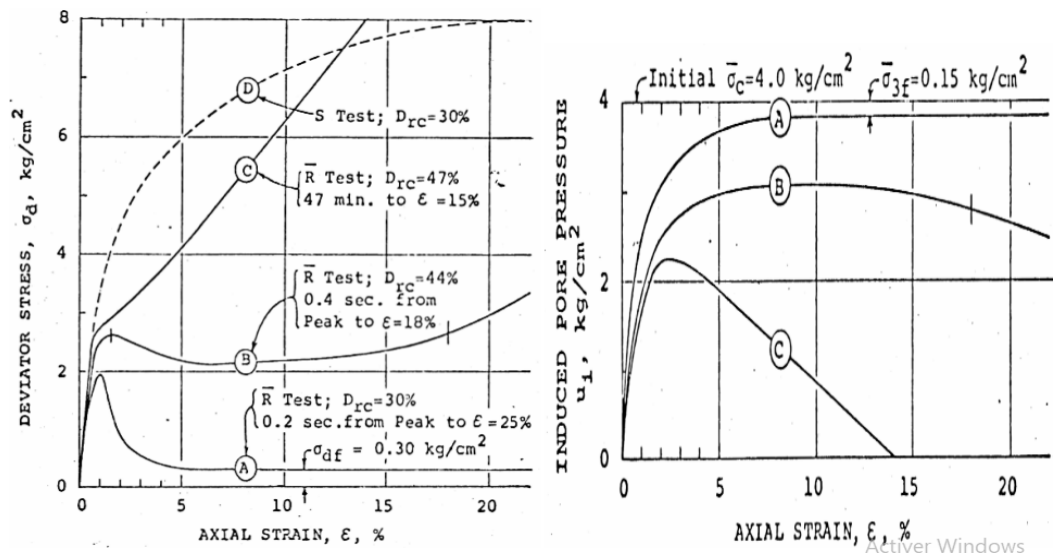


Figure 1.7: Essais triaxiaux monotones non drainés (A, B et C) et drainé (D) sur sable (Casagrande 1975).

Au début du chargement, nous constatons sur la figure 1.7 établie par Casagrande (1975), une augmentation de la pression interstitielle pour les 3 essais non drainés (A), (B), et (C), puis une annulation de la vitesse de variation de la pression interstitielle pour les sables lâches (A), tandis que pour les sables plus denses (B) et (C), nous observons après annulation de la vitesse de variation de la pression interstitielle, une décroissance de celle-ci. Pour l'essai (A), l'échantillon va présenter une chute de résistance au cisaillement, c'est la liquéfaction. Par contre les essais (B) et (C), la décroissance de la pression interstitielle se manifeste par une reprise de résistance au cisaillement de l'échantillon. Le niveau de contrainte déviatoire pour lequel s'inverse le signe des vitesses de variation de la pression interstitielle lors d'un essai non drainé, correspond au même niveau de contrainte déviatoire pour lequel la vitesse de variation de la déformation volumique change de signe lors d'un essai drainé. Ce niveau de contrainte a été défini par Habib et Luong (1978), comme étant l'état caractéristique du matériau.

1.6 Paramètres influant sur la résistance au cisaillement des sables

Le sable est un matériau " de frottement ", on peut donc considérer que les facteurs qui augmentent la résistance au frottement du sable entraînent une augmentation de l'angle de frottement interne, différents paramètres peuvent contribuer à influencer le comportement des sables. La littérature a étudié en détail l'état de contrainte actuel, l'effet de la densité relative, de la pression de confinement, le degré de saturation et d'autres paramètres qui influencent la propriété des sables de se dilater ou de se contracter, qui fait l'objet d'une étude approfondie.

1.6.1 L'état de contrainte actuel

L'état de contrainte initial d'un élément de sol au repos à une profondeur H est défini par les contraintes effectives σ'_h et σ'_v en vigueur à cette profondeur. Ces contraintes effectives s'appliquent aux faces verticales et horizontales respectivement.

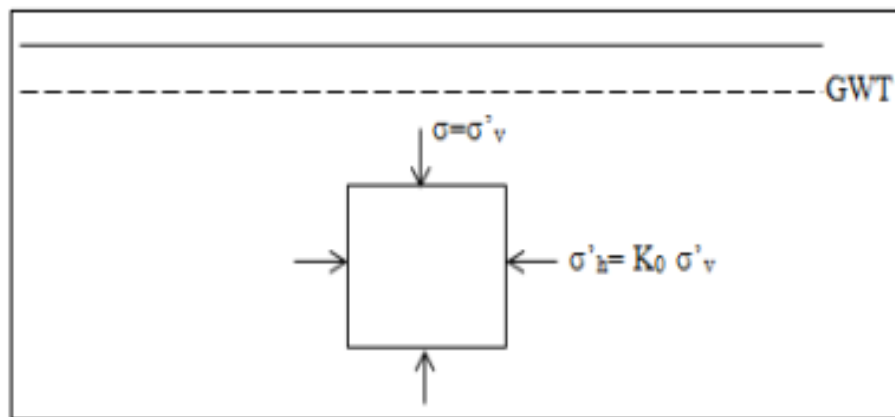


Figure 1. 8: Etat de contrainte initial d'un élément de sol au repos

Où; K_0 = Coefficient des terres au repos.

σ'_h = Contrainte effective horizontale.

σ'_v = Contrainte effective verticale.

1.6.2 Influence de la densité relative

La densité relative, également connue sous le nom d'indice de densité, est un facteur crucial qui affecte le comportement des sols granulaires. En 1998, Yoshimine et Ishihara ont présenté

les résultats d'essais de compression triaxiale non drainée menés par [Verdugo \(1992\)](#) sur le sable de Toyoura. Les essais ont été réalisés avec différents indices de vide et une contrainte de consolidation isotrope fixe de $p'_c = 490$ KPa. Les auteurs ont constaté que le sable lâche à tendance de se contracter, ce qui le rend susceptible de se liquéfier avec un fort adoucissement, conduisant même parfois à une liquéfaction totale pour des échantillons avec des indices de vide de $e=0,930$. Cependant, à mesure que l'indice des vides diminue, les échantillons deviennent plus stables. Dans le plan (q, p'') , on observe une diminution continue de la contrainte effective moyenne, avec une migration vers l'origine des axes, pour finalement se stabiliser dans l'état de déformation stable.

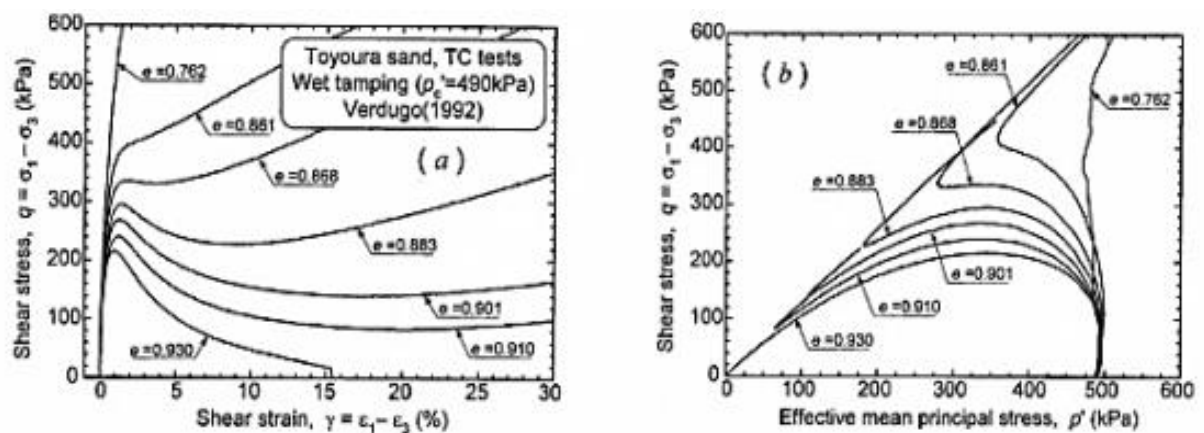


Figure 1.9: Influence de l'indice des vides sur le comportement monotone non drainé du sable de Toyoura ([Verdugo 1992](#))

Par ailleurs, l'indice de densité influence de manière significative le comportement cyclique des sables. L'apparition d'une liquéfaction réelle ou d'une mobilité cyclique lors d'une charge cyclique est principalement influencée par l'état de la densité du sol. Les résultats de [Lee et Seed \(1967\)](#) ont démontré l'impact notable de la densité relative sur l'amélioration de la résistance au cisaillement cyclique et la réduction de la probabilité de liquéfaction (figure 1.10). Le même résultat a été obtenu dans les recherches menées par ([Ladd et al. 1989](#)).

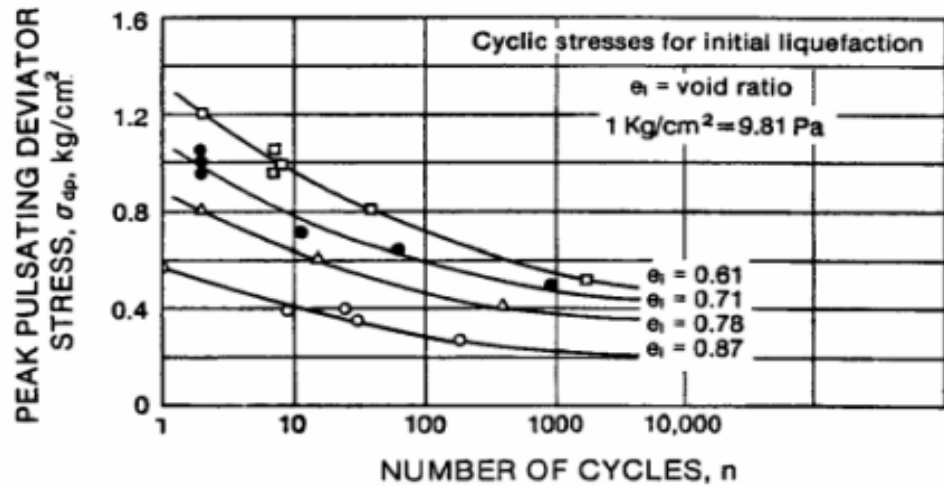


Figure 1. 10: L'effet de l'indice des vides sur la résistance au cisaillement cyclique (Lee and Seed 1967)

(Ahmed Arab, 2009) a effectué des essais triaxiaux cycliques et a trouvé que le potentiel de liquéfaction du sable de Chlef est affecté par la densité relative à trois différents degrés :

$ID = 0,15, 0,50$ et $0,65$. Comme le montre la figure 1.11, la résistance au cisaillement du sable augmente lorsque la densité relative augmente et que l'amplitude de chargement diminue.

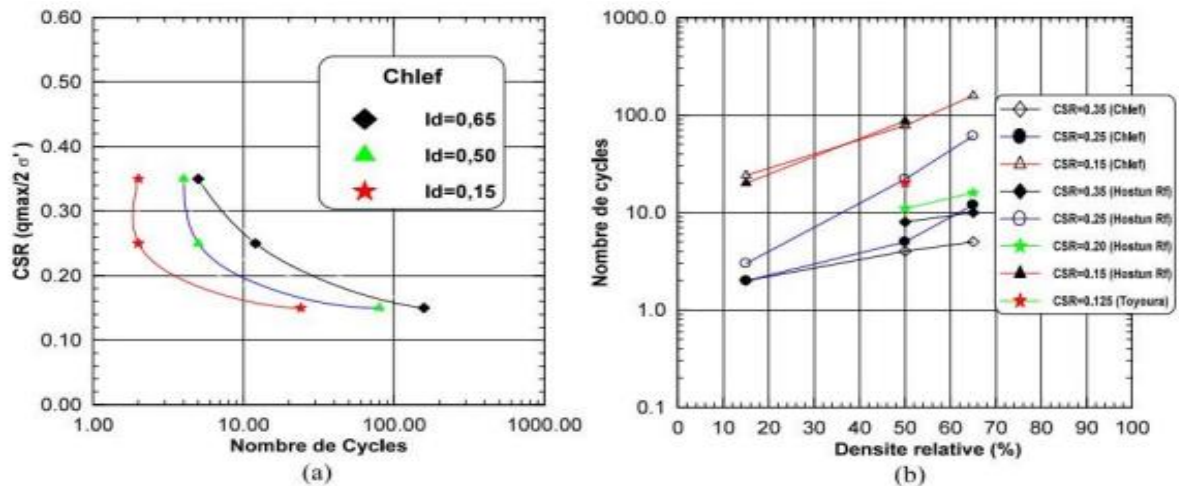


Figure 1.11: Effet de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction du sable de Chlef (Ahmed Arab, 2009)

1.6.3 Présence de fines

L'étude des sols liquéfiés in situ a montré qu'ils sont principalement constitués de matériaux alluviaux, qui contiennent une quantité importante de fines. L'étude des sols liquéfiés in situ a révélé qu'ils sont principalement constitués de matériaux alluviaux, qui contiennent une quantité importante de fines. Selon (Lade & Yamamuro, 1997), ce phénomène est dû à une structure très compressible qui se forme entre les particules de sol les plus petites et les plus grandes. Les fines présentes dans le sol se déposent aux points de contact entre les grains du sol.

Lorsque ces fines sont cisailées, elles ont tendance à remplir les espaces vides, ce qui entraîne une tendance à la contraction. Ce comportement se traduit finalement par une liquéfaction statique dans des conditions non drainées (voir figure 1.12). Pendant le cisaillement, un meilleur contact entre les particules les plus grosses a été observé, entraînant une tendance croissante à la dilatation avec l'augmentation de la contrainte et de la déformation. Cependant, pour les sols ayant des pourcentages élevés de fines, le sable a tendance à subir une contraction volumique importante, ce qui peut supprimer toute tendance à la dilatation, quelle que soit l'ampleur des contraintes et des déformations. Par conséquent, la perte de résistance au cisaillement non drainé peut se produire à des densités relatives très élevées.

Il convient de noter que l'augmentation de la teneur en fines peut accroître le potentiel de liquéfaction du sol jusqu'à un certain seuil au-delà duquel les fines dominent le comportement non drainé du sol.

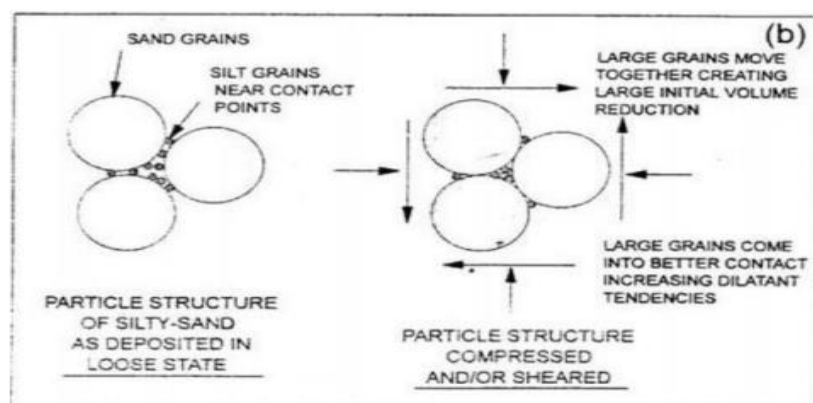


Figure 1.12: Schématisation de la densification après le cisaillement de la structure d'après (Lade & Yamamuro, 1997).

L'effet des fractions de fines sur la résistance du sol à la liquéfaction est principalement lié à leur indice de plasticité. Cependant, les résultats expérimentaux sur ce sujet donnent encore lieu à des divergences d'opinion ([K. Ishihara, 1985](#); [Ralph H. Kuerbis, 1985](#); [Erten & Maher, 1995](#)). Certaines études montrent que l'augmentation de la fraction de fines peut améliorer la résistance au cisaillement non drainé des sols ([F.Amini, 2000](#)), alors que d'autres indiquent une diminution de cette résistance lorsque la fraction de fines augmente ([Tronsoco & Verdugo, 1995](#)). ([Arab, 2009](#)) a mené une étude en laboratoire sur l'influence des fines à faible plasticité sur le comportement des sables silteux. L'étude est basée sur des essais triaxiaux monotones drainés et non drainés pour des fractions de fines comprises entre 0 et 50 % et des essais cycliques pour des fractions de fines comprises entre 0 et 40 %. Les essais montrent que la contrainte résiduelle diminue de manière linéaire et significative avec l'augmentation des fractions fines. Ceci affecte de manière significative le comportement volumétrique, qui se manifeste par une amplification de la phase de contraction à mesure que la fraction de fines augmente (figures 1.13 et 1.14).

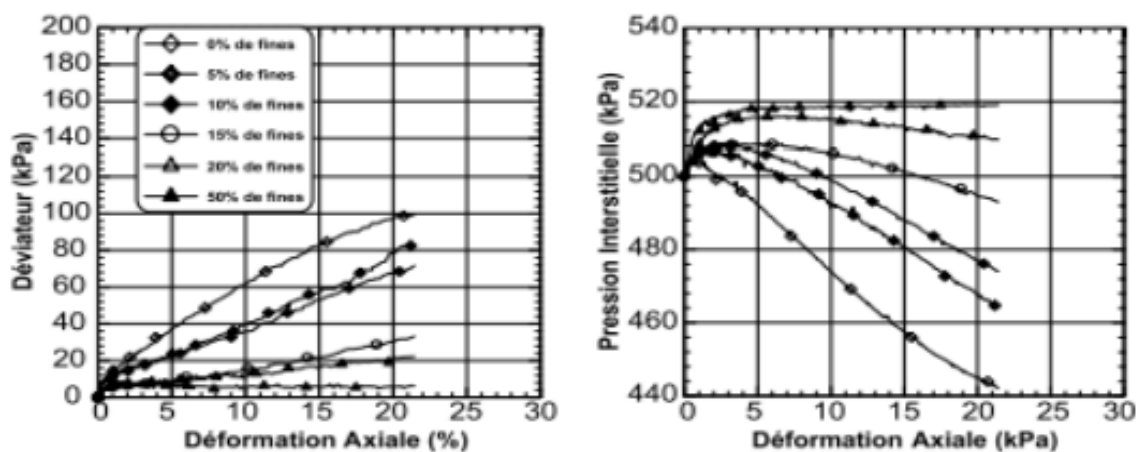


Figure 1.13: L'influence de la teneur des fines sur le comportement non drainé d'un mélange sable-limon ([Arab, 2009](#))

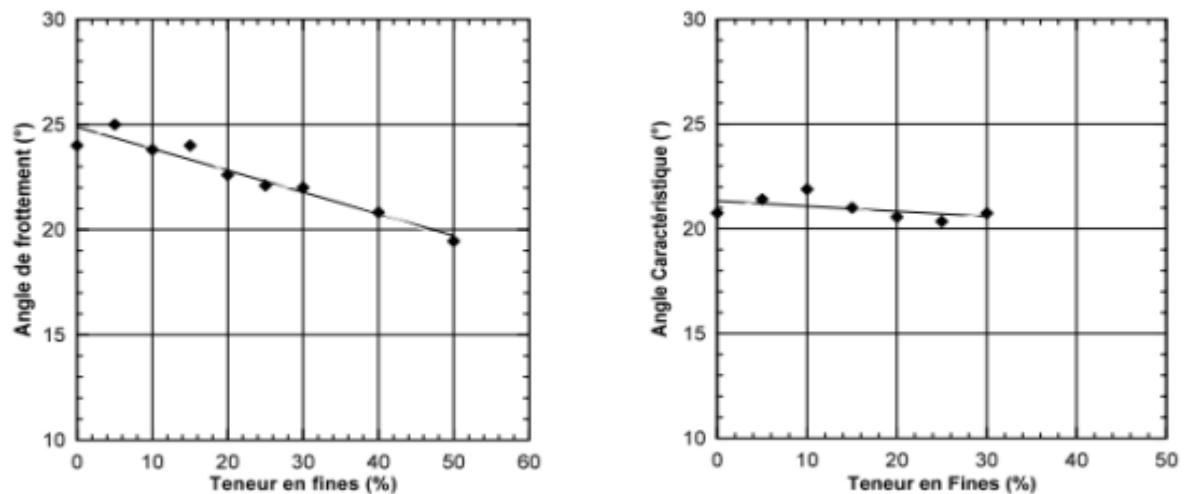


Figure 1.14: Influence de la fraction des fines sur l'angle de frottement et l'angle caractéristique (Arab, 2009)

D'autres études trouvent un chemin intermédiaire, considérant que la résistance au cisaillement non drainé diminue au fur et à mesure que la teneur en fines augmente, jusqu'à atteindre une résistance minimale. Ensuite, la résistance au cisaillement non drainé recommence à augmenter à mesure que la teneur en fines continue à augmenter. (Benghalia et al., 2015) ont mené des essais cycliques sur trois types de sable, à savoir le sable de Chlef, le sable d'Oued Rass et le sable de Zemmouri. Ils ont découvert que la résistance cyclique du sable diminue au fur et à mesure que la quantité de fines diminue, jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur limite de $f_{c_{thre}} = 5\%$. Ensuite, la résistance cyclique augmente avec l'augmentation des fines à faible plasticité (Figure 1.15). Cette tendance est conforme aux conclusions de Ling (1992) ; Belkhatir et al. (2010) ; Ingabire et al., (2019) ; Goudarzi et al., (2022).

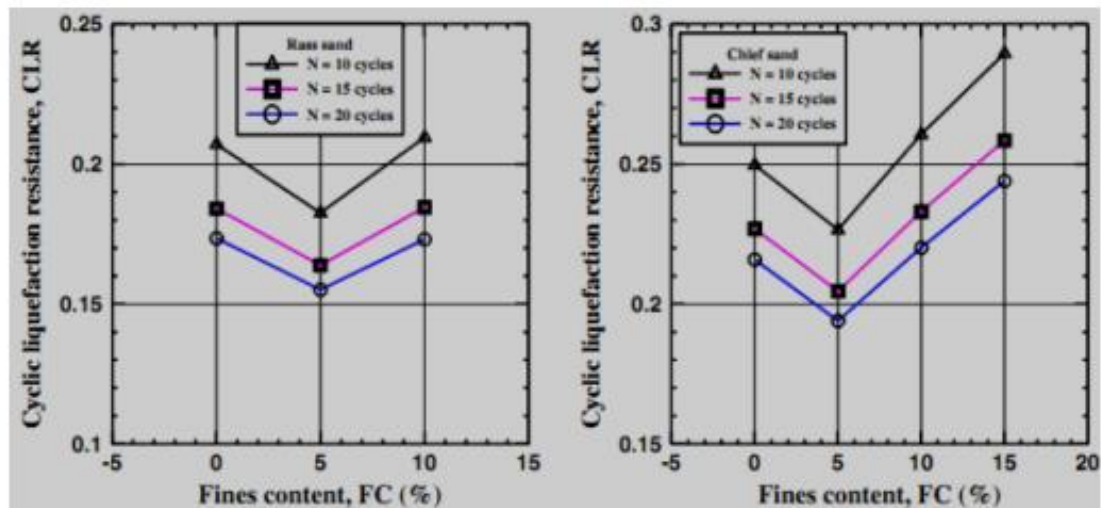


Figure 1.15: Effet de fines peu plastiques sur la résistance à la liquéfaction cyclique (Benghalia et al., 2015)

1.6.4 Influence de la saturation

Plusieurs études en laboratoire ont démontré que la résistance à la liquéfaction des sables augmente lorsque le degré de saturation diminue (Sherif et al., 1977; Yoshimine & Ishihara, 1998; J. Yang, 2001; K Ishihara et al., 2001; Tsukamoto et al., 2002; Jun Yang, 2002; Maciej Serda et al., 2013; Baki et al., 2023). (Pecker, 1984) a indiqué qu'une diminution de 2 % du degré de saturation entraîne une augmentation de 50 % de la résistance à la liquéfaction. Il est donc nécessaire de s'assurer que les échantillons sont complètement saturés lors des essais en laboratoire. (Della et al., 2010) ont rapporté qu'une augmentation du degré de saturation entraîne une diminution de la résistance non drainée du sable de Chlef, qui a été préparé à une densité relative de 50% ($D_r=50\%$). Simultanément, cette réduction est suivie d'une augmentation de la valeur maximale de la pression interstitielle et d'une diminution de la contrainte effective moyenne (Figure 1.16).

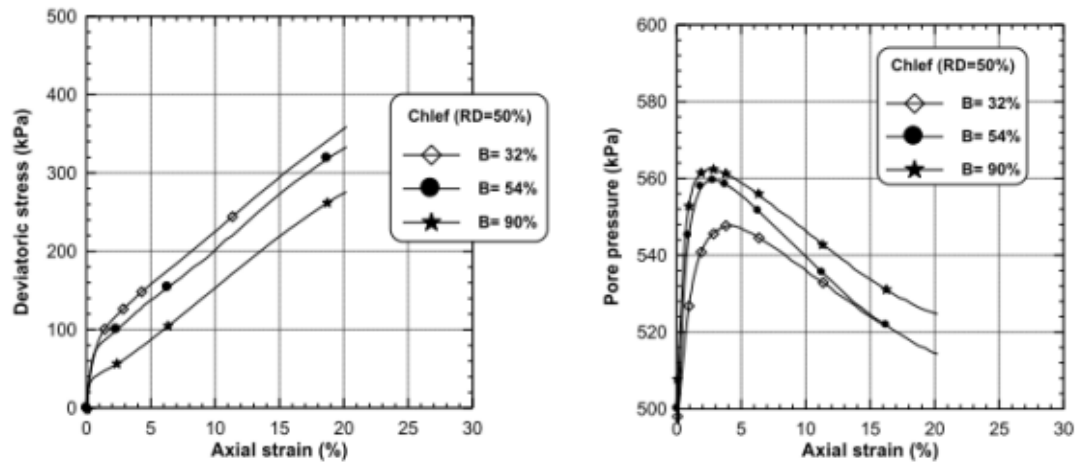


Figure 1.16: Influence du coefficient de Skempton (B) sur le comportement non drainé du sable de Chlef (Della et al., 2010)

1.6.5 Influence de la méthode de préparation

La méthode de préparation a un effet important sur la résistance au cisaillement du sol en général et sur la résistance à la liquéfaction. Plusieurs études ont été effectuées pour analyser l'influence du mode de préparation sur le potentiel de liquéfaction. (Wichtmann et al., 2020) ont réalisé des essais monotones sur le sable de Karlsruhe préparé à différents états de densité relative (lâche, moyennement dense et dense) et soumis à une pression initiale ($p_0=100$ KPa). Ces auteurs ont constaté que la méthode de préparation de damage humide présente une résistance à la liquéfaction plus élevée par rapport la méthode de dépôt à sec (Figure 1.17).

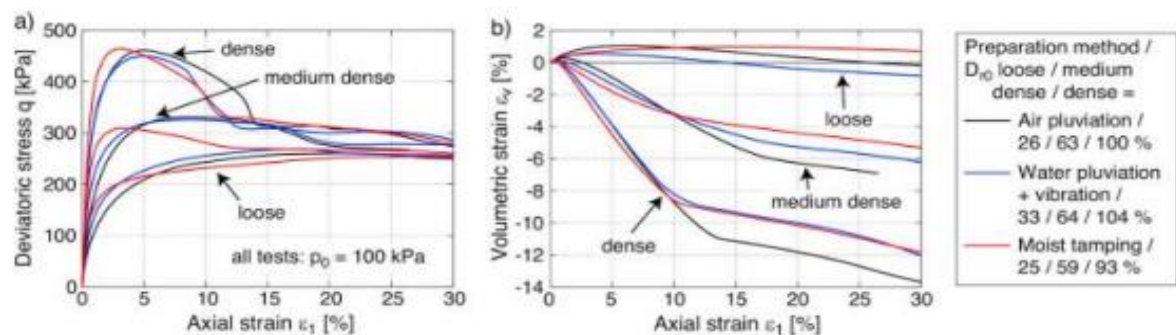


Figure 1.17: Courbes a) de la contrainte déviatorique $q(\epsilon_1)$ et b) de la déformation volumétrique $\epsilon_v(\epsilon_1)$ mesurées lors d'essais triaxiaux monotones drainés sur des échantillons lâche, moyennement denses et denses préparés par trois méthodes différentes (pluviation à l'air, pluviation à l'eau avec vibration ultérieure, damage humide en huit couches) (Wichtmann et al., 2020)

1.6.6 Le pré chargement

Des recherches antérieures démontrent l'impact significatif de l'historique du pré chargement sur les changements de comportement du sol. Plusieurs études ont été menées en laboratoire pour étudier la liquéfaction statique et cyclique. Les échantillons utilisés dans ces études ont été reconstitués à travers des méthodes différentes et soumis à divers types de pré chargement, dans le but de reproduire les diverses contraintes que subissent les sols dans des conditions naturelles (telles que les tremblements de terre, l'érosion, la sédimentation, le changement de la nappe phréatique, l'excavation et l'enlèvement de la surcharge). L'objectif principal de ces études était de comprendre l'influence du pré chargement sur le comportement conséquent des sols. (Bouferra et al., 2007) effectuent une investigation expérimentale de la liquéfaction de sable d'Hostun sous l'effet d'un chargement cyclique non drainée, les résultats montrent qu'un pré chargement important réduit la résistance des sables à la liquéfaction. Le phénomène de liquéfaction du sol ne peut être observé que lorsqu'une applique des sollicitations cyclique comportant un changement de signe du déviateur (Shibata & Miyoshi, 1972; Kenji Ishihara et al., 1975; Vaid et Finn, 1979; Mohkam, 1983; A. Gajo and L.Piffer, 1999), Lorsqu'une contrainte de cisaillement initiale est appliquée, la résistance à la liquéfaction augmente. La figure 1.18 présente les résultats de deux séries d'essais réalisés par (Arab et al., 2014) sur des spécimens de sols soumis à une contrainte de pré chargement. Ils ont constaté que le pré chargement augmente la résistance au cisaillement non drainé. pour la contrainte $q_m = 60 \text{ kPa}$, la liquéfaction est observée après 11 cycles pour l'échantillon

soumis à 5 cycles et après 16 cycles pour l'échantillon soumis à 10 cycles ; il est à noter que le sol qui n'a pas été soumis à une charge cyclique s'est liquéfié après 5 cycles. pour la contrainte $q_m = 40 \text{ kPa}$, la liquéfaction est observée après 31 cycles pour l'échantillon ayant subi 5 cycles et après 37 cycles pour l'échantillon ayant subi 10 cycles ; à noter que le sol non sollicité de manière cyclique s'est liquéfié après 8 cycles. Pour la contrainte $q_m = 30 \text{ kPa}$, la liquéfaction est observée après 80 cycles pour l'échantillon soumis à 5 cycles et après 95 cycles pour l'échantillon préchargé avec 10 cycles ; à noter que le sol qui n'a pas subi de charge cyclique a été liquéfié après 23 cycles.

Le chargement cyclique drainé améliore la résistance à la liquéfaction des sols, en ce qui concerne l'effet des 5 premiers cycles, il est plus important que celui des 5 derniers cycles. Ce résultat peut être expliqué par le fait que le chargement cyclique densifie l'état du sol et augmente par conséquent sa dilatation.

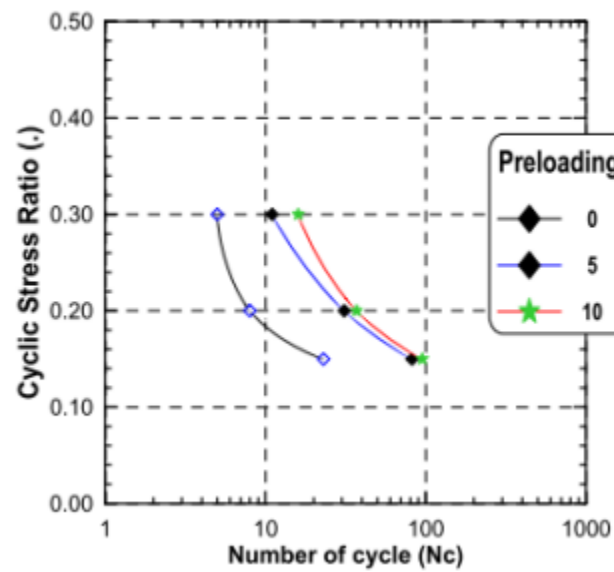


Figure 1. 18: Influence d'un pré chargement cyclique sur résistance au cisaillement non drainé du mélange sable de Rass- limon SM ($FC10\%$, $ID = 0,65$) (Arab et al, 2014)

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique sur le comportement des sols granulaires sous différents types de chargement. L'objectif est de comprendre clairement l'instabilité des sols granulaires. Les études de la littérature montrent que les milieux granulaires tels que les sables et les sables limoneux, qui sont soit saturés soit déposés dans des environnements sous-marins, sont des sols les plus susceptibles de perdre leur résistance sous cisaillement. Divers facteurs affectant le comportement mécanique ont été rapportés dans la littérature, notamment la densité relative, la contrainte de confinement, la teneur en fines, le pré chargement,....etc.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les différentes techniques d'amélioration du sol utilisées dans le but de réduire ou limiter le risque d'instabilité du sol.

Chapitre II : Traitement de sol avec ciment et poudre de brique et Renforcement par fibre de polypropylène

2.1 Introduction

Le sol est l'assise de tous les bâtiments et structures, mais il est exposé à divers problèmes tels que la faible résistance à la compression et au cisaillement, l'instabilité, la nature étendue, le retrait de volume, la fissuration due à la sécheresse, la grande stabilité sous chargement et la faible tolérance aux intempéries.

Des facteurs tels que le mouillage et le séchage ou le dégel et le gel ont une grande influence sur le comportement des sols en général.

Ces problèmes sont devenus contraignants pour les ingénieurs géotechniciens dans les travaux de terrassement ou de construction d'importants projets (routes, voies ferrées, bâtiments...) Les propriétés géotechniques de ces sols peuvent être améliorées en utilisant certains additifs traditionnels tels que le ciment et la chaux, la poudre de brique et en raison des émissions de dioxyde de carbone de ces dernières et de leur impact sur l'environnement, les ingénieurs ont eu recours à des matériaux respectueux de l'environnement pour renforcer le sol, tels que les fibres naturelles et les bio-polymères.

2.2 Produits de cimentation

2.2.1 *Liants hydrauliques*

2.2.1.1 *Ciment*

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment agglomère fortement les matériaux inertes incorporés dans le mélange. (Figure 2.1)



Figure 2.1: Ciment.

Chapitre II Traitement de sol avec ciment et poudre de brique et renforcement par fibre de polypropylène

Les liants hydrauliques courants sont subdivisés selon la normalisation en vigueur en cinq types en fonction de leur composition

- CEM I: Ciment Portland.
- CEM II: Ciment Portland composites.
- CEM III : Ciment de haut fourneau.
- CEM IV : Ciment pouzzolanique.
- CEM V : Ciment composé.

Les constituants du ciment présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes :

Des propriétés hydrauliques : par réaction avec l'eau, ils forment des composés hydratés stables qui sont très peu solubles dans l'eau.

Des propriétés pouzzolaniques : ils peuvent former à température ordinaire, en présence d'eau et par combinaison avec la chaux, des composés hydratés stables.

Des propriétés physiques : améliorant certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité) comme le montre le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Différents types de ciments courants.

Désignation du type de ciment	Notation	Composition
Ciment Portland	CPA/CEM1	Au moins 95% de clinker et de 0 à 5% de constituants secondaires
Ciment Portland compose	CPJ/CEM II /A	Entre 80 et 94%de clinker et 6 à 20 % d'autres constituants
	CPJ/CEM II /B	Entre 65et 79%de clinker et 21 à 35 % d'autres constituants
Ciment de haut-fourneau	CHF/CEM III /A	Entre 35et 64%de clinker et 36 à 65 % de laitier de haut-fourneau
	CHF/CEM III /B	Entre 20 et 34%de clinker et 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau
	CHF/CEM III C	Entre 5 et 19 %de clinker et à 95 % de laitier de haut-fourneau
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV	Entre 45et 64%de clinker et 36 à 55 % de pouzzolane de cendres volantes siliceuses de fumées de silice (< 10% pour ces demiere)
	CPZ-CEM IV	Entre 40 et 64 % de clinker et 18 à 30 % de cendres volantes siliceuses de fumées de silice (< 10% pour ces demiere)

Chapitre II Traitement de sol avec ciment et poudre de brique et renforcement par fibre de polypropylène

Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM VA	Entre 40 et 64 % de clinker et 18 à 30 % de laitier et 18 à 30 % de cendres volantes de pouzzolane
	CLC-CEM VB	Entre 20 et 39 % de clinker et 31 à 50 % de laitier et 31 à 50 % de cendres volantes de pouzzolane

2.2.1.2 Pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés.

Ce sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes.

Les avantages de remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction de réactions alcalines des agrégats et du retrait au séchage.

Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland (Figure 2.2).



Figure 2.2: Pouzzolane naturelle.

2.2.1.3 Cendres volantes

Les cendres volantes sont les résidus finement divisés résultant de la combustion du charbon pulvérisé. Elles constituent un produit minéral pulvérulent, consécutif du dépoussiérage des fumées rejetées par les centrales thermiques, qui utilisent du charbon broyé comme combustible en présence ou non de matériaux de Co-combustibles. Ces cendres sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les gaz de fumée des chaudières (Figure 2.3).



Figure2.3: cendres volantes

2.2.1.4 Laitiers de hauts fourneaux

Sous-produits de l'industrie sidérurgique lors de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux, les laitiers sont formés de constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke. Leur composition en oxydes et leur structure vitreuse obtenue par trempe à l'eau leur confèrent des propriétés hydrauliques latentes, ce qui permet d'envisager leur utilisation en tant qu'ajout dans les ciments. Le laitier de haut-fourneau vitrifié possède des propriétés particulières. Il a une structure vitreuse, c'est-à-dire une structure où les atomes sont désordonnés, contrairement à un cristal (Figure2.4).



Figure 2.4: Laitiers de haut fourneau.

2.2.1.5 Dolomie

La dolomie est une roche sédimentaire carbonatée d'origine marine, riche en calcium, en magnésium et en oligo-éléments. On ne peut parler de dolomie que lorsqu'elle contient un minimum de 50 % de dolomite, carbonate double de calcium et de magnésium de formule $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. L'autre composant est la calcite, un carbonate de calcium de formule CaCO_3 . On parle aussi de calcaire dolomitique ou de calcaire magnésien. Exploitées en carrières, les dolomies constituent de bons matériaux de construction (Figure2.5).



Figure 2.5: Dolomie.

2.2.1.6 La chaux

La chaux est un produit naturel qui respecte l'environnement. La chaux est une matière, généralement, poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis l'antiquité, notamment dans la construction. Elle trouve une place privilégiée dans le secteur du bâtiment et dans les matériaux de construction. La chaux intervient à différents stades du traitement des sols, et sa qualité a une influence directe sur l'efficacité du traitement des sols. La chaux désigne les produits dérivés du calcaire. Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. On extrait le calcaire dans des carrières et des mines à travers le monde. La chaux aérienne est obtenue par décarbonatation du calcaire (CaCO_3) à une température d'environ 900°C suivant la réaction :



La chaux aérienne peut exister sous quatre formes : chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux et chaux vive lourde.

Chacune d'entre elles présentant avec les sols des interactions spécifiques (Figure 2.6).



Figure 2.6: Chaux vive.

- Chaux éteinte : Elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 . Elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique (Figure 2.7).

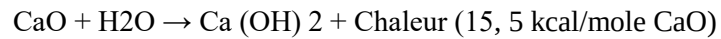


Figure 2.7: Chaux éteinte.

- Lait de chaux : Le lait de chaux est obtenu par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau. La concentration varie entre 300 et 400 g de chaux éteinte par litre de lait. Le lait de chaux peut également être préparé à partir de chaux vive, mais des précautions particulières sont à prendre en raison de l'exothermicité de la réaction d'hydratation de l'oxyde de calcium (Figure 2.8).



Figure 2.8: Lait de chaux

- Chaux vive lourde : La chaux vive est alourdie par addition d'huile de colza. Cette chaux est moins volatile et, par conséquent, son emploi permet de réduire les émissions de poussières. Son utilisation est préconisée dans certaines zones de projets incluant des dispositions particulières de protection de l'environnement (Figure 2.9).

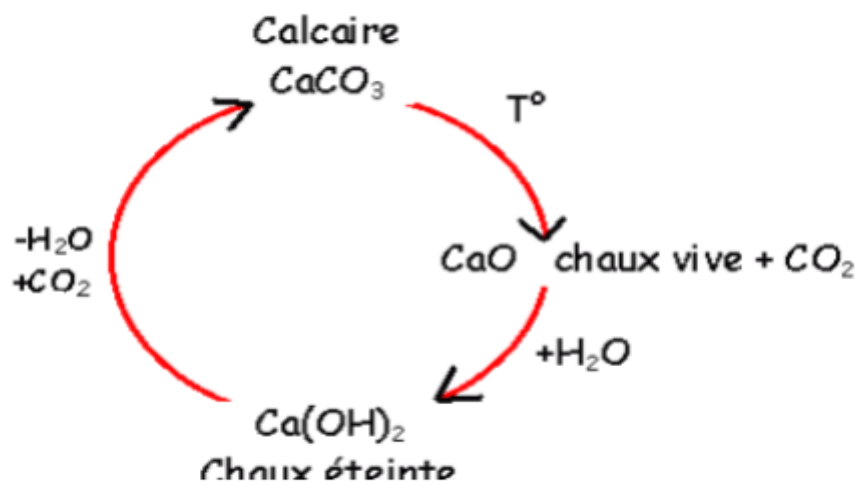


Figure 2.9: Cycle de la chaux.

2.3 Avantages du traitement

Le traitement des sols à la chaux et/ou au ciment ou aux liants hydrauliques(LHR) est une technologie qui offre trois types d'avantages fondamentaux : la technologie, économique et environnemental.

2.3.1 Avantages techniques

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique permet la réalisation des remblais et des couches de forme. Une couche traitée homogène, durable et stable, présente des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. En outre, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure. Cette technique assure un bon comportement sansorniérage et un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à la rigidité du matériau et à l'effet de dalle induit. Enfin, le traitement des sols en place est une technique possédant une facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation.

2.3.2 Avantages économiques

Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique est une technique de traitement à froid, donc utilisant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport. L'absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier

2.3.3 Avantages écologiques et environnementaux :

Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'utilisateur et aux riverains et une réduction de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier. La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue à préserver l'environnement.

2.4 Différentes techniques de stabilisation des sols

De nombreux chercheurs ont proposé plusieurs méthodes pour résoudre l'instabilité des sols sableux lorsqu'ils sont soumis à différents hasards. L'objectif de ces méthodes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques et hydrauliques des sols. L'utilisation de ces méthodes a un

Chapitre II Traitement de sol avec ciment et poudre de brique et renforcement par fibre de polypropylène

impact sur de nombreux domaines pratiques de l'ingénierie géotechnique en raison de leur facilité de mise en œuvre, de leur coût abordable et de leur impact minimal sur l'environnement. [Manfred R, \(1990\)](#) a classé les techniques d'amélioration et de renforcement du sol en quatre groupes :

- La méthode mécanique consiste à utiliser des forces externes pour augmenter la densité du sol. Cela peut se faire par des méthodes telles que le compactage statique, le compactage dynamique ou le compactage en profondeur par un battage important.
- La modification hydraulique consiste à utiliser des drains ou des puits pour pomper l'eau interstitielle qui se trouve dans le sol. Pour les sols à gros grains ou sans cohésion, le niveau de la nappe phréatique peut être réduit par pompage à partir de tranchées ou de puits. Pour les sols à grain fin ou cohésifs, il est possible d'appliquer une pression externe à long terme (pré chargement) ou des charges électriques (stabilisation électrocinétique). La stabilisation électrocinétique est une méthode qui utilise des courants électriques pour mobiliser les particules d'eau dans le sol, ce qui permet d'assécher et de stabiliser efficacement les sols argileux et boueux. Cette technique peut être utilisée pour renforcer les fondations des routes, réduisant ainsi les problèmes de tassement et d'affaissement.
- Modification physique et chimique : Un exemple de cette méthode est la stabilisation du sol par le mélange physique d'additifs dans les couches supérieures en profondeur. Ces additifs peuvent être des sols naturels, des sous-produits industriels, des déchets ou d'autres ajouts chimiques susceptibles de réagir avec le sol. D'autres applications comprennent la modification du sol par injection de produits et les modifications thermiques, qui ont été discutées précédemment. Le processus de renforcement du sol nécessite l'utilisation de matériaux tels que des grilles, des barres, des bandes, des fibres et des tissus qui améliorent la résistance à la traction du sol. En outre, le renforcement du site à l'aide d'éléments en béton, en acier ou en tissu peut contribuer à la création de structures de soutènement stables. Le renforcement des sols est une méthode d'amélioration des sols qui consiste à utiliser des matériaux synthétiques ou naturels pour améliorer les caractéristiques ou les propriétés du sol.

Il existe plusieurs techniques de renforcement des sols problématiques, qui peuvent être classées selon différentes méthodes. La figure 2.10 présente différents schémas d'amélioration du sol, en particulier le traitement du site ou le renforcement du sol ([Hejazi et al., 2012](#)).

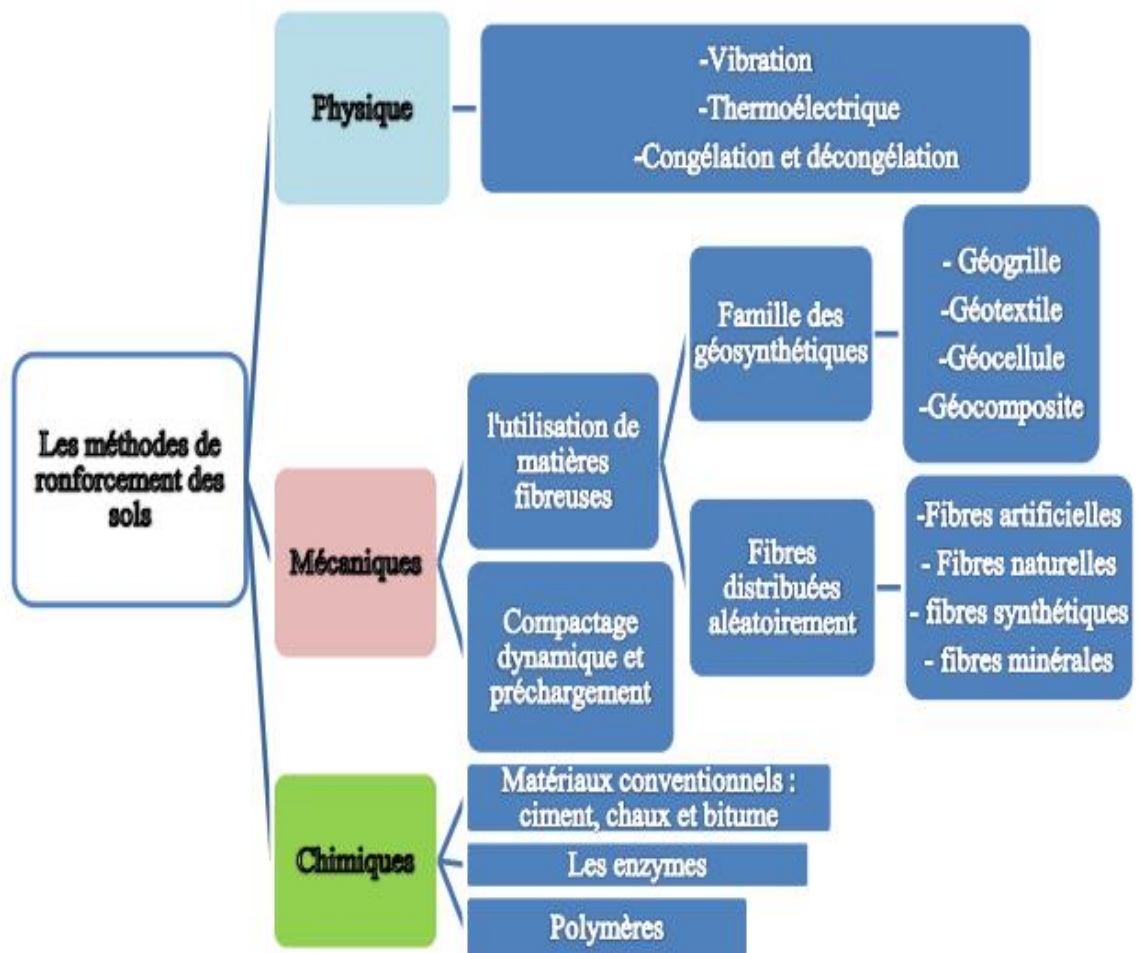


Figure 2.10: Différentes méthodes de renforcement du sol

2.5 Renforcement des sols par fibres

L'utilisation des fibres de renforcement est une méthode bien étudiée et couramment utilisée en géotechnique pour améliorer les propriétés mécaniques des sols. Cette technique est particulièrement utile pour les sols sableux, dont la cohésion et la résistance au cisaillement sont généralement faibles. En ajoutant des fibres discrètes au sol, celui-ci résiste mieux à la déformation et aux charges, ce qui améliore sa stabilité et sa capacité portante (Gray & Ohashi, 1983; Ding, D., Hargrove, 2006; Tang et al., 2007; Rao & Nasr, 2012 ;Fang et al., 2020). Dans la nature, les racines des plantes et les autres matières organiques contribuent à la stabilité et à la cohésion du sol. Les racines agissent comme des renforts naturels, augmentant la résistance du sol à l'érosion et à la déformation. Ce principe a été adapté à l'ingénierie en incorporant des fibres synthétiques et naturelles dans le sol, créant ainsi un matériau composite qui combine la résistance à la traction des fibres et la résistance à la compression

Chapitre II Traitement de sol avec ciment et poudre de brique et renforcement par fibre de polypropylène

du sol. Le sol renforcé de fibres se comporte comme un matériau composite : Une combinaison de sol (matrice) et de fibres (renforcement) où chaque composant contribue aux propriétés mécaniques globales. où les fibres sont intégrées dans la matrice du sol. Les fibres présentent une résistance à la traction, qui est renforcée lorsque le sol est soumis à des contraintes de cisaillement. Cette interaction entre le sol et les fibres renforce la résistance et la stabilité globales du sol, le rendant plus résistant à la rupture et à la déformation ([Ding, D., Hargrove, 2006](#); [Shukla et al., 2009](#) ;[Michalowski, 2015](#); [Fang et al., 2020](#)). Le renforcement par les fibres est devenu important dans la pratique de la construction du génie civil grâce à son imitation dans la nature. Le développement des sols renforcés par des fibres a permis de reproduire artificiellement différents types de fibres naturelles et synthétiques qui ont pour effet de renforcer, de stabiliser et de consolider le sol. Le sol renforcé par des fibres se comporte comme un matériau composite dans lequel des fibres d'une résistance à la traction relativement élevée sont intégrées dans une matrice de sol. Les contraintes de cisaillement dans le sol mobilisent la résistance à la traction des fibres, ce qui augmente la résistance du sol.([Gray & Ohashi, 1983](#) ;[Noorzad & Zarinkolaei, 2015](#); [Claria & Vettorelo, 2016](#); [Liu et al., 2020](#); [Salimi & Ghazavi, 2021](#)). L'intégration des fibres dans le sol entraîne la formation d'un réseau tridimensionnel qui relie de manière significative les particules du sol, et qui facilite ainsi le développement d'une structure cohésive et améliore la résistance au roulement des grains (voir la figure 2.11). Des recherches approfondies ont montré que la rugosité de la surface des fibres joue un rôle primordial dans l'amélioration de leur résistance au glissement ([Namjoo et al., 2021](#); [Chai et al., 2024](#)). Pendant le mélange de la fibre ou le compactage des échantillons, les particules de sable dur heurteraient et d'abrasions la surface de la fibre. La fibre s'est alors déformée et a même perdu une partie de sa couche superficielle. Les vides et les rainures qui en résultent à la surface de la fibre constituent un point de liaison plus fort entre la fibre et la matrice de sable. Ces interactions mécaniques entre la fibre et le sable dépendant de la densité sèche du sable et de la teneur en fibre.



Figure 2.11: Mécanisme de l'interaction sol-fibre

2.6 Différents type de fibres

2.6.1 Fibres artificielles synthétiques

Le polymère synthétique est un matériau écologique et prometteur qui a trouvé des applications dans le domaine du génie civil en tant que stabilisateur de sol alternatif. Il peut être utilisé sous forme de liquide, de poudre ou de fibre et est également connu sous le nom de polymères synthétiques, synthétisés par polymérisation de molécules chimiques. Il a été utilisé pour améliorer les propriétés du sol telles que la résistance, la rigidité, la perméabilité, la résistance à l'érosion, la stabilité de l'eau et les changements de volume. Parmi les polymères synthétiques couramment utilisés dans les applications géotechniques figurent le polyacrylamide (PAM), le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polyuréthane (PU), le polystyrène (PS) et le copolymère de styrène, l'acétate de polyvinyle (PVA), l'alcool polyvinylique (PVAO) et le chlorure de polyvinyle (PVC) ([Almajed et al., 2022](#)). Il existe différents types de fibres synthétiques comme présenté dans la figure 2.10, et chacun de ces types sera présenté ci-dessous.

2.6.1.1 Polyacrylamide (PAM)

Le PAM [-CH₂CHCONH₂-] est produit par la polymérisation de l'acrylamide, obtenu par l'hydratation de l'acrylonitrile ([Manson et al., 2005](#); [Daliri et al., 2021](#); [Pramanik et al., 2021](#)). Les PAM existent sous différentes formes : molécules chargées anioniques, neutres et cationiques. La structure moléculaire des PAM peut être linéaire ou réticulée, la molécule linéaire étant soluble dans l'eau tandis que la molécule réticulée absorbe l'eau mais n'est pas soluble dans l'eau ([Sojka et al., 2007](#)).

Les PAM sont utilisés dans le traitement de l'eau potable, la fabrication du papier, la flottation des minéraux, la valorisation du pétrole, la stabilisation des pentes raides et des routes, le

renforcement des sols instables, l'amélioration de la capacité portante et la prévention de l'érosion des sols (Green & Stott, 2001; Kurenkov et al., 2002; Erumezescu et al., 2016; Wiśniewska et al., 2016). Le PAM est utilisé pour stabiliser les pentes raides et les coupures de routes, renforcer les sols meubles, améliorer la capacité portante et atténuer l'érosion. Le PAM est le polymère synthétique le plus souvent utilisé pour atténuer l'érosion liée à la construction (Sojka, 2003). Ce polymère est largement utilisé en raison de sa grande efficacité, de son faible coût et du fait qu'il nécessite une quantité moindre pour obtenir un résultat souhaitable (Sojka et al., 2007).

2.6.1.2 Fibres de polypropylène (PP)

La fibre de polypropylène est une fibre synthétique couramment utilisée pour renforcer le sol et le béton (Song et al., 2005). Elle est hydrophobe, résistante à la corrosion par les produits chimiques, les alcalis et les chlorures (Hejazi et al., 2012). L'utilisation de fibres de polypropylène peut augmenter la résistance à la compression non confinée (UCS) et la résistance au cisaillement du sol. (Consoli et al., 2003) étudié la réponse d'un sol à partir de l'essai de chargement à la plaque sur un sol sableux épais et compacté, renforcé par des fibres de PP. Les spécimens renforcés par des fibres PP à montrer un comportement important de durcissement jusqu'à des déformations axiales supérieures à 20 %, alors que les spécimens non renforcés ont montré un comportement presque parfaitement plastique à des déformations considérables. Cette amélioration indique l'application potentielle du renforcement par fibres dans les fondations peu profondes, les remblais sur sols meubles et d'autres travaux de terrassement susceptibles de subir des déformations excessives.

2.6.1.3 Fibres de polyester (PE)

Une catégorie de polymères est caractérisée par la présence de groupes fonctionnels esters dans leur chaîne principale. Parmi les différents types de ces polymères, le polyéthylène téréphtalate (PET) est le plus connu. (Maheshwari et al., 2011) ont étudié un sol argileux renforcé par des fibres de polyester réparties de manière aléatoire. L'étude a fait varier la quantité de fibres de polyester (d'un diamètre de 12 mm) mélangées au sol argileux hautement compressible de 0 à 1 %. Les résultats ont indiqué une augmentation significative de la capacité portante avec l'inclusion de fibres de polyester jusqu'à 0,50 %, puis une diminution de la capacité portante après l'ajout de fibres.

2.6.1.4 Fibres de verre

L'inclusion de fibres de verre dans un sable limoneux augmente la résistance maximale parce que l'inclusion de fibres est plus efficace pour un sol non cimenté. L'angle de frottement du sol sableux renforcé de fibres de verre est également augmenté de 35° à 46° (Consoli et al., 1998). Une amélioration significative des paramètres de résistance des sols renforcés par des fibres de verre dans différents types de sols a été observée. Ceci est bien montré avec une augmentation des valeurs de cohésion et des angles de frottement interne. Les propriétés de cette fibre, à savoir sa légèreté, sa disponibilité et son caractère non biodégradable, sont bénéfiques et permettent de prouver que cette fibre peut être utilisée pour l'amélioration à long terme des sols (Beycioglu et al., 2021).

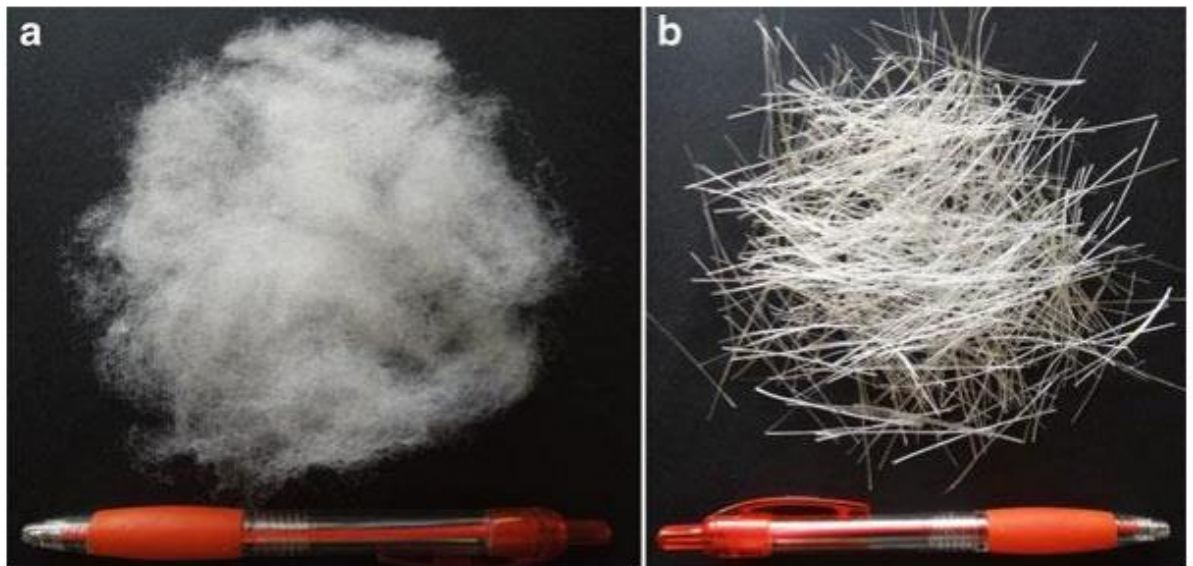


Figure 2.12: Fibres synthétiques : (a) fibres de polypropylène (PP), (b) fibres de verre (Sanjay Kumar Shukla, 2017)

2.6.2 Fibres Naturelles

Aujourd'hui, les fibres naturelles sont largement utilisées dans divers secteurs tels que la construction civile, l'industrie, l'alimentation et l'agriculture, en raison de leur disponibilité, de leur durabilité, de leur coût avantageux, de leur faible densité, de leur résistance, de leur rigidité et de leurs avantages pour l'environnement. Les fibres naturelles peuvent être classées suivant leur origine. Il existe trois grandes familles comme le montre la figure 2.13.

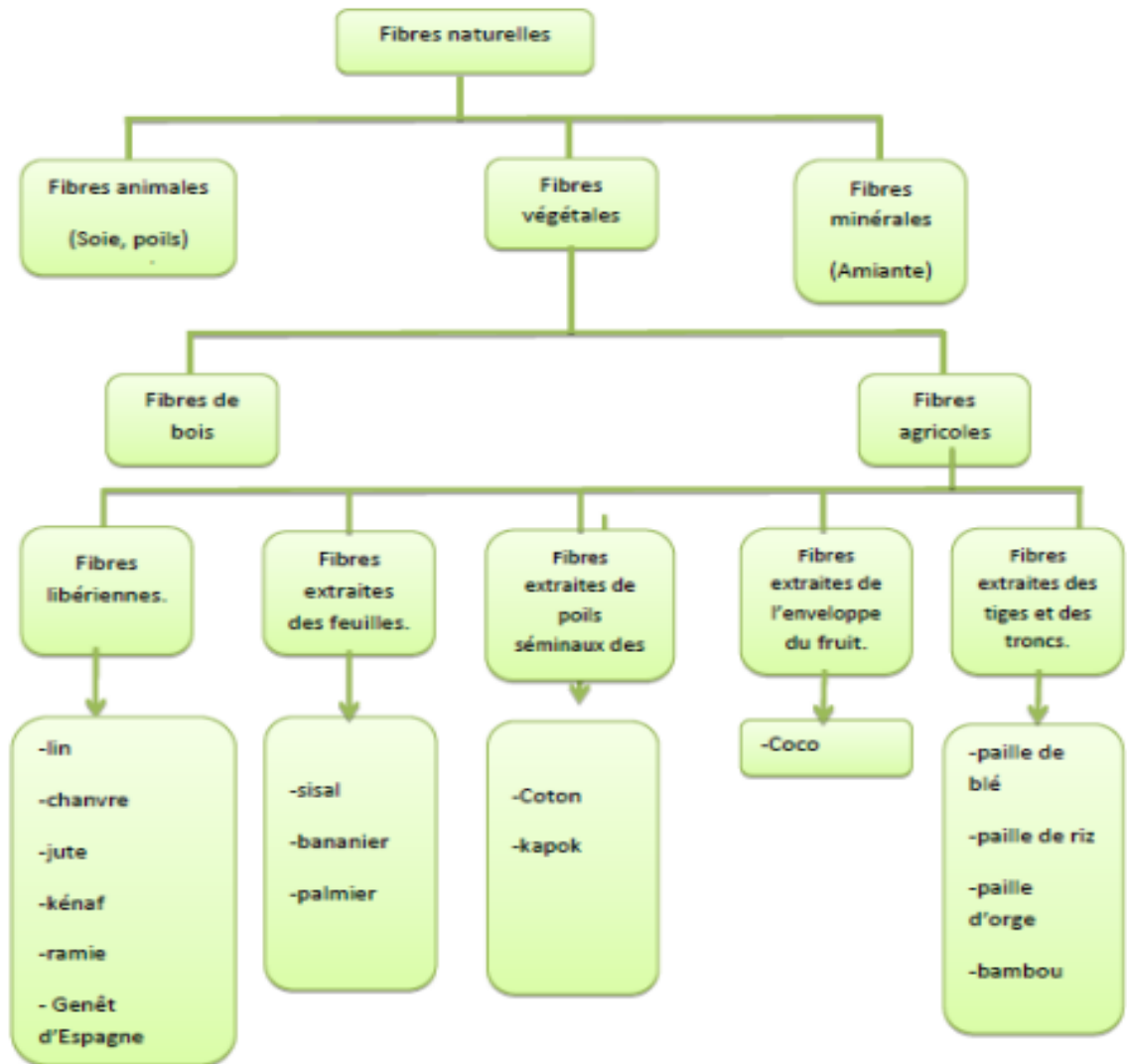


Figure 2.13: Classification des fibres naturelles selon (Baley, 2004)

-Les fibres végétales sont utilisées dans des applications géotechniques telles que le renforcement des sols, la stabilité des pentes et le contrôle de l'érosion. Le fibre de coir, dérivée de la noix de coco, est utilisée dans les géotextiles pour la bio-ingénierie et le contrôle de l'érosion (Khan et al., 2024).

Le tableau 2.2 présente les différents types de fibres végétales couramment utilisés en géotechnique. Les applications géotechniques des fibres végétales énumérées dans le tableau ci-dessous sont de nature générale. Il est important de noter que les qualités spécifiques énumérées ci-dessous peuvent varier en fonction du traitement et de la manipulation de la fibre (Luzi et al. 2019).

Tableau 2.2: Liste des fibres végétales avec leurs avantages et leurs applications

Type de fibres végétales	Avantages Application	Applications	Ref
Bamboo	Durable, flexible et solide	Renforcement des structures (	(Medina-Martinez et al., 2022)
Jute	Contrôle de l'érosion Biodégradable, économique	Renforcement des sols (Sing	(Singh et al., 2023)
Cotton	Résistance élevée à la traction, absorption	Filtration, système de drainage	(EsmaeilpourShirvani et al., 2019)
Coir	Durable, résistant à la dégradation microbiologique	Stabilisation des pentes, contrôle des sédiments	(Syed and Guha Ray, 2021)

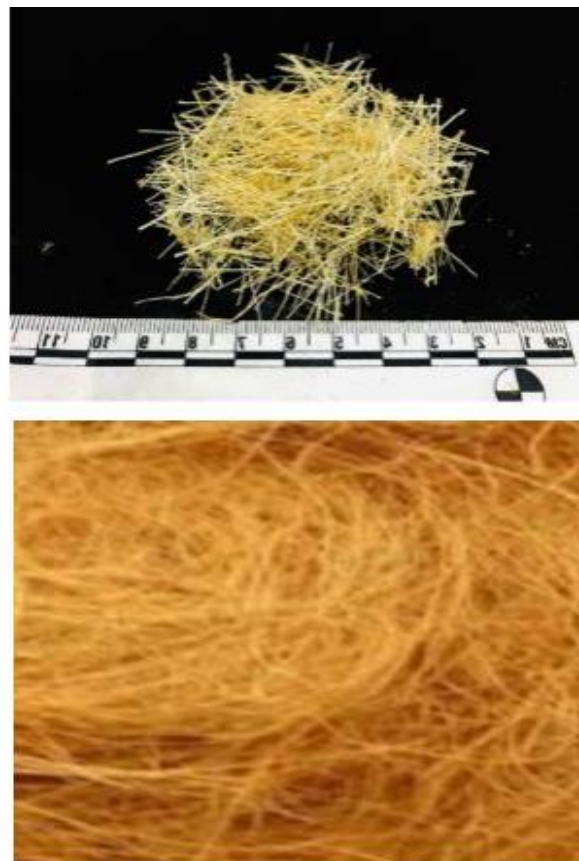


Figure 2.14: Les fibres végétales (a) Fibre de sisal (Hao et al., 2023), (b) Fibre de Coir ([Kaushik & Singh, 2021](#))

- Les fibres animales contenant des protéines, telles que la soie, les poils et la laine. - Les fibres minérales (amiante) ; La fibre minérale (ou amiante) désigne une large gamme de fibres possédant une grande élasticité et une résistance exceptionnelle à la corrosion, à l'humidité, à

la forte chaleur, à l'usure, etc, comme les fibres de basalte (figure 2.15). En outre, les fibres minérales possèdent une conductivité électrique inférieure et sont incombustibles. Les fibres minérales présentent une très bonne compatibilité avec les matériaux de construction (tels que le béton, la cimenterie et le mortier), ce qui explique que de grandes quantités de fibres minérales soient extraites des mines. Par exemple, on les mélange à du ciment pour produire des matériaux renforcés de fibres d'amiante pour les revêtements de sols, afin de les utiliser comme un produit de protection contre le feu et d'isolation, ce qui était très populaire parmi la plupart des populations à faibles ressources dans différents pays, tels que le Brésil ([Roux & Robertson, 2000](#)).



Figure 2.15: Fibres de basalte ([Zhang et al., 2023](#))

2.7 Paramètres influençant le comportement des sols renforcés par des fibres

L'efficacité des fibres en tant que matériau de renforcement dans les sols dépend de divers paramètres liés aux propriétés des fibres et aux caractéristiques du sol. Parmi ces paramètres citons le type, la teneur, la longueur, le rapport d'aspect, le module d'élasticité et l'orientation des fibres, ainsi que la taille, la forme, la granulométrie, le mode de chargement, le niveau de contrainte et la densité des particules du sol.

2.7.1 L'effet des caractéristiques du sol

2.7.1.1 L'influence de la morphologie des grains

Selon [Al-Refeai \(1991\)](#), les résultats des essais triaxiaux ont montré que le sable fin avec des particules sous-jacentes se comporte mieux avec le renforcement par fibres que le sable moyen avec des particules sub-angulaires.

Lorsque les sables ont la même taille de particules, une angularité plus élevée a entraîné une plus grande efficacité de contact. Cette étude montre également que le type de sable n'a pas une grande influence sur le rapport d'angle de frottement.

2.7.1.2 Effet de la taille des grains

[Dos Santos et al. \(2010\)](#) ont réalisé des tests de compression triaxiaux, les contraintes élevées subies pendant la compression isotrope, environ 50 MPa, ont analysé la rupture des particules par la comparaison de la distribution granulométrique du sable avant et après l'essai. La figure 2.16 illustre la courbe granulométrique moyenne obtenue; elle s'est déplacée vers le haut au cours de l'essai en raison de la compression du sable pur, ce qui indique qu'il y a un endommagement des particules. La distribution granulométrique du sable renforcé par des fibres, qui a été soumis à des contraintes similaires, a également été déterminée après des tests de classement répétés. En comparaison avec la granulométrie du sable pur après les essais, il est possible que la rupture des fibres dans les composites fibre-sable soit limitée. Il est difficile de comprendre ce qui s'est passé au niveau des particules. Une hypothèse, celle du sable-fibre, consiste à dire tout simplement que l'énergie perdue lors de la déformation et de la rupture de la fibre réduit l'énergie nécessaire à l'écrasement des particules. Une autre hypothèse pourrait être que les fibres, en entourant certains des grains, contribuent à réduire l'abrasion.

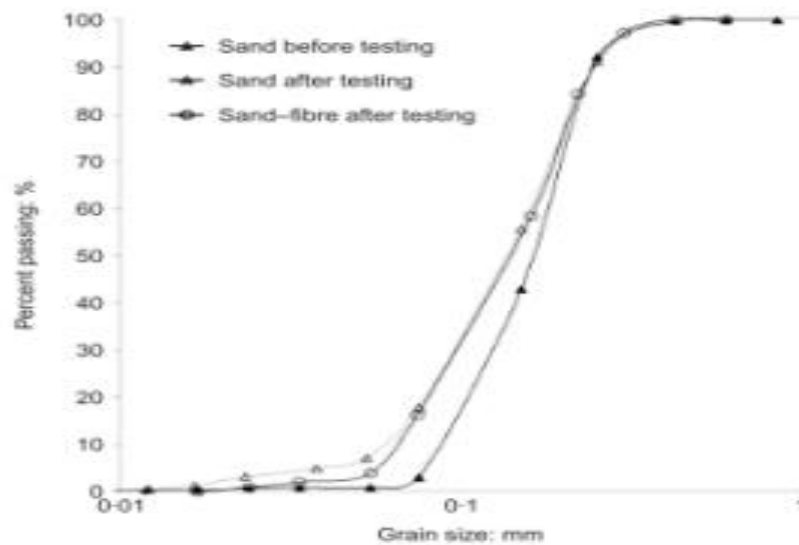


Figure 2.16: Évolution de la granulométrie au cours de la compression isotrope à environ 50 MPa pour les échantillons de sable et de mélange fibres-sable (Dos Santos et al., 2010).

Selon Maher et Gray (1990) il a été constaté que la résistance du sable renforcé augmente lorsque la taille moyenne des grains (D_{50}) est réduite pour la même contrainte de confinement.

Ganiev et al. (2022) montre la dépendance du rapport de contrainte ($\eta = q/p'$) par rapport à la déformation axiale ϵ_a comme il est montré dans la figure 2.17. Ils concluent que l'ajout de fibres augmente le rapport de contrainte par rapport à l'augmentation de la teneur en fibres. En outre, les rapports de contrainte des échantillons de sable non renforcés et renforcés par des fibres atteignent les mêmes valeurs pour une teneur en fibres définie à la fin du cisaillement, indépendamment de la densité relative initiale. Le comportement de cisaillement drainé du sable renforcé par des fibres avec des teneurs en fibres de 0,2 % et 0,4 % sous la même contrainte de confinement avec des densités relatives initiales différentes a montré un comportement similaire à celui du sable non renforcé.

A la fin du cisaillement (déformation axiale de 20%), les contraintes déviatoriques respectives étaient approximativement les mêmes, et le volume spécifique atteignait presque la même valeur même si la densité relative initiale était différente. Selon ce comportement mécanique observé, il est donc considéré que l'état de contrainte à la fin du cisaillement est proche de l'état critique.

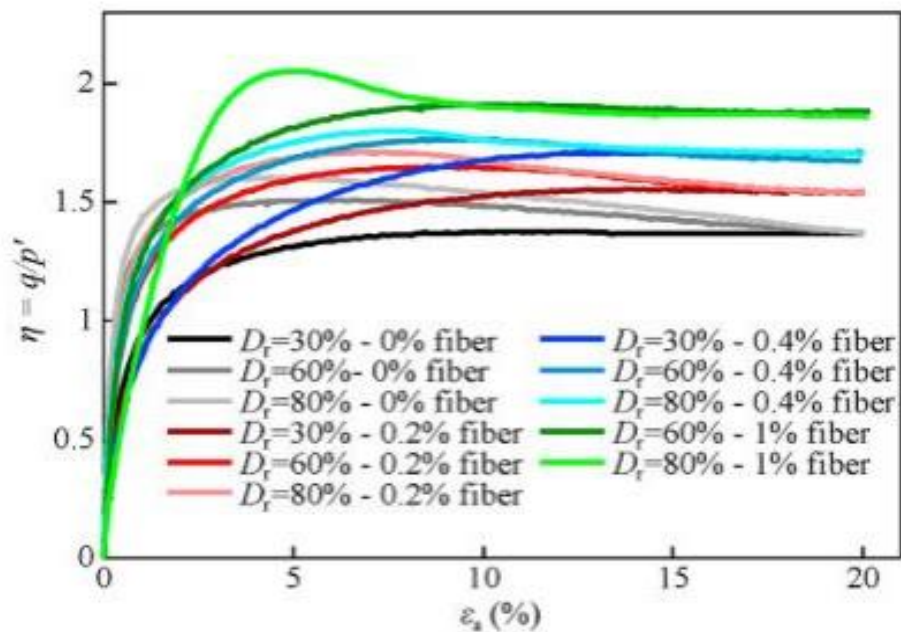


Figure 2.17: Relation entre le rapport de contrainte et la déformation axiale pour toutes les teneurs en fibres et différentes densités relatives initiales. (Ganiev et al., 2022)

2.7.2 L'effet des propriétés des fibres

2.7.2.1 L'effet de type des fibres

La figure 2.18 montre une stabilisation récente de talus à l'aide d'un géotextile de jute réalisée au Vietnam (2022-2023) combinée à la végétation, qui a fait l'objet d'une attention croissante au cours des dernières années en raison de ses avantages environnementaux. Dans cette application, les géotextiles de jute sont installés pour couvrir la surface du sol avant la mise en place d'un système de végétation avec des plantes spécifiques (par exemple, des herbes et des arbustes). Le développement des plantes est bien soutenu par les géotextiles de jute (par exemple, l'érosion du sol de surface est atténuée), tandis que la propagation des racines des plantes à long terme améliore la résistance à l'érosion de la pente. Ce concept de techniques de bio-engineering vertes a été pratiqué avec succès au cours des dernières années, en particulier dans les régions tropicales et agricoles telles que l'Indonésie, la Thaïlande, l'Inde, le Bangladesh, etc. (Nguyen & Indraratna, 2023). Ces dernières années, la littérature sur l'utilisation des fibres naturelles a été plus importante. Selon une étude de Saini et al. (2024), les fibres naturelles peuvent être utilisées comme renforts à haute performance dans les éléments structuraux, à la fois pour les nouvelles constructions et pour la réhabilitation des structures existantes. Ces éléments structuraux offrent des performances élevées pour des conditions de construction optimales à des niveaux de contrainte faibles à moyens.



Figure 2.18: Utilisation de géotextiles de jute pour le contrôle de l'érosion et la stabilisation des pentes (projet pratique réalisé au Vietnam, 2022-2023, photo fournie par FUCON).

D'après (Nguyen & Indraratna, 2023)

Cependant [Mujah et al. \(2013\)](#) ont rapporté que les paramètres de résistance des sols renforcés par des fibres de verre dans différents types de sol s'amélioraient de manière significative. Cette amélioration est clairement démontrée par l'augmentation des valeurs de cohésion et des angles de frottement interne. La légèreté, la disponibilité et les propriétés non biodégradables de ces fibres montrent qu'elles peuvent être utilisées pour l'amélioration à long terme des sols.

L'effet de l'augmentation de la teneur en plastique avec un rapport d'aspect de 3 sur le comportement contrainte-déformation des échantillons de sol renforcée par déchets plastique est illustré dans (la figure 2.19) ([Mir, 2020](#)) il montre que la compression non confinée augmente avec l'ajout de matière plastique. Les résultats de l'essai à montrer que la valeur maximale de l'UCS est obtenue pour une teneur en plastique de 1 % avec un rapport d'aspect de 3:1. L'augmentant la teneur en plastique de 1%, les valeurs UCS diminuent. ([Ghasemi Nezhad & Tabarsa, 2023](#)) La présente étude a étudié l'utilisation de fibres synthétiques de polyester (PES) et de fibres naturelles de basalte (BS) et de bagasse (BG) sur la résistance et le comportement mécanique d'un sol sableux dans des projets de construction de chaussées (figure 2.20) . Les résultats montrent que la meilleure résistance à la traction sera liée à la F_c de 2 % et à la longueur de 7,5 mm et les échantillons de sol non renforcé ont un comportement plutôt fragile et leur flexibilité augmente avec l'ajout de fibres.

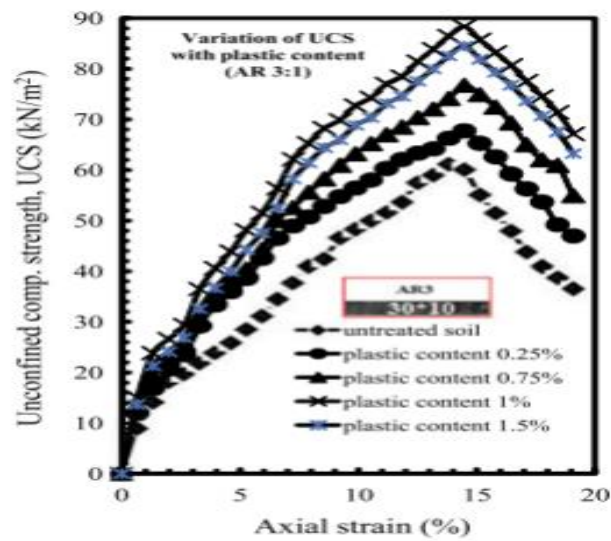


Figure 2.19: Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction de la teneur en matière plastique (Mir, 2020)

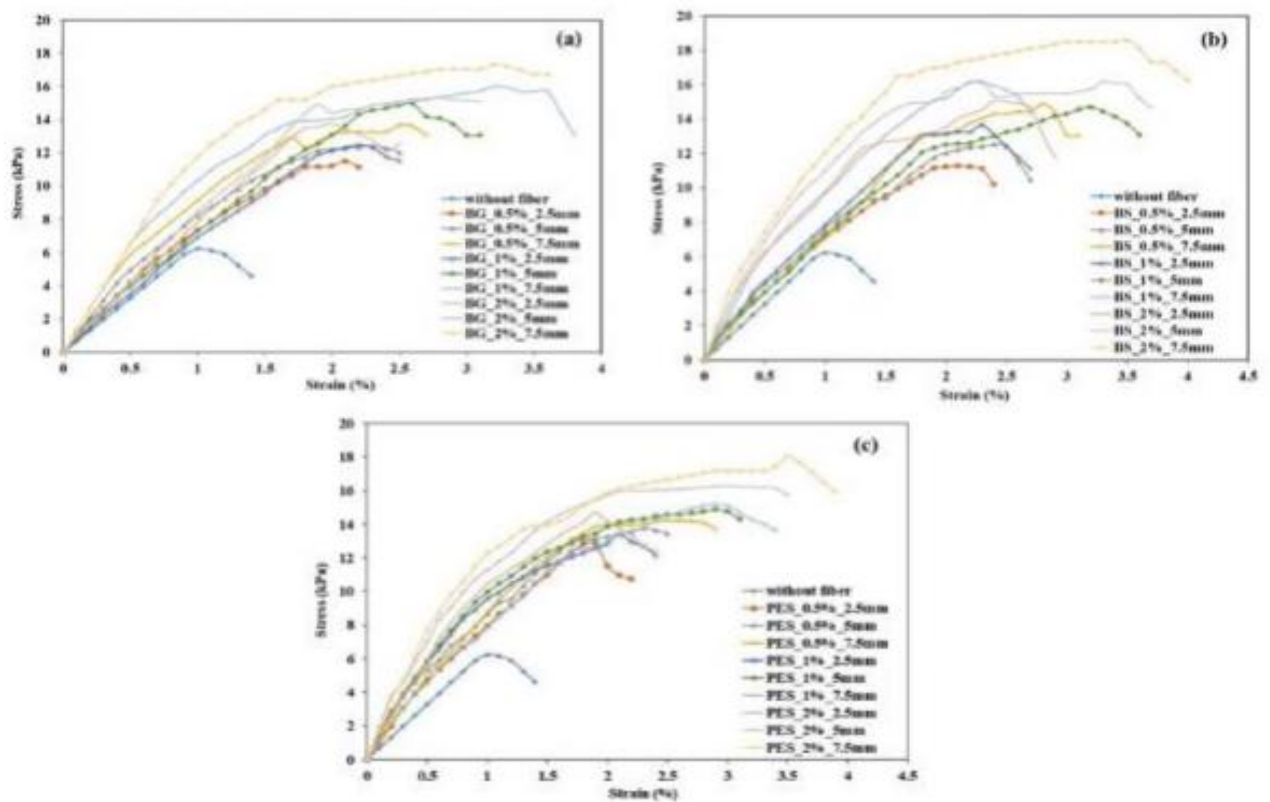


Figure 2.20: Courbes contrainte-déformation : (a) Fibre de bagasse (b) Fibre de basalte (c) Fibre de polyester. (Ghasemi Nezhad & Tabarsa, 2023)

2.7.2.2 Effet de la teneur en fibres

Benessalah et al. (2016) sur la base des résultats de leurs tests, a montré que l'effet de la teneur en fibres a un effet passif sur la résistance au cisaillement résiduelle qui se situe entre 170 et 190 KPa pour les échantillons secs renforcés par rapport aux échantillons secs non renforcés où elle est de 200 KPa, comme mentionnée dans la figure 2.21 (a), pour les échantillons humides avec une teneur en eau de 3%, la forme de la courbe de résistance au cisaillement a à une phase de comportement quasi-linéaire de tous les échantillons, et cette phase a été changée après un déplacement horizontal de 0.25mm pour l'échantillon non renforcé et de 0.5mm pour les échantillons renforcés, le renforcement par fibres est plus efficace sur les échantillons humides, où la résistance au cisaillement à la fin de l'essai prend des valeurs de 170 et 185 KPa pour les échantillons renforcés et 160 KPa pour les échantillons non renforcés (figure 2.21b).

L'ajout de fibres n'améliore pas seulement la résistance au cisaillement du sol, mais contribue également à la résistance vis-à-vis des déformations imposées par les sollicitations, ce qui peut se traduire par une minimisation des fissures de contraction et de dilatation des échantillons de sable.

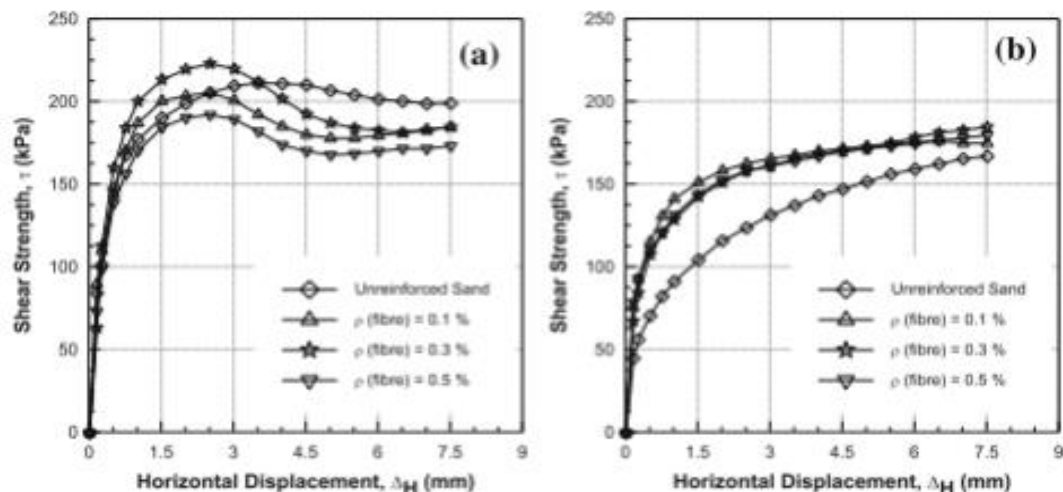


Figure 2.21: Effet sur les fibres de la résistance au cisaillement d'une pression de confinement de 200 KPa et d'une densité relative élevée $Dr = 87\%$: (a) variation de la résistance au cisaillement en fonction de la forme de déformation horizontale du sable sec, (b) variation de la résistance au cisaillement en fonction de déformation horizontale avec une teneur en eau de l'échantillon $w = 3\%$. (Benessalah et al., 2016).

Plusieurs analyses réalisées par [Aouali et al. \(2019\)](#) ont révélé que tous les échantillons renforcés par des fibres présentent une meilleure performance en termes de résistance au cisaillement par rapport au sol non renforcé. Néanmoins, les tendances ne sont pas régulières, la performance optimale étant obtenue pour une teneur en fibre de 0,25 % qui présente une résistance au cisaillement maximale autour de 3 mm de déplacement horizontal, suivie d'une légère diminution jusqu'à la fin de l'essai. Les échantillons ayant une teneur en fibres plus élevée de 0,30 et 0,50 % présentent une valeur de résistance au cisaillement maximale inférieure à celle obtenue avec 0,25 % comme le montre la figure 2.22 (a). D'autre part, la figure 2.22 (b) montre l'effet des inclusions de fibres sur le comportement du déplacement vertical. Il confirme les résultats observés pour la résistance au cisaillement. En effet, la phase de contraction observée dans les sols non renforcés diminue avec l'introduction de fibres, conduisant à un comportement dilatant pour des déplacements horizontaux supérieurs à 2 mm. La valeur optimale du renforcement volumétrique est de 0,25%, où le déplacement vertical maximal est significativement réduit par rapport à l'échantillon non renforcé.

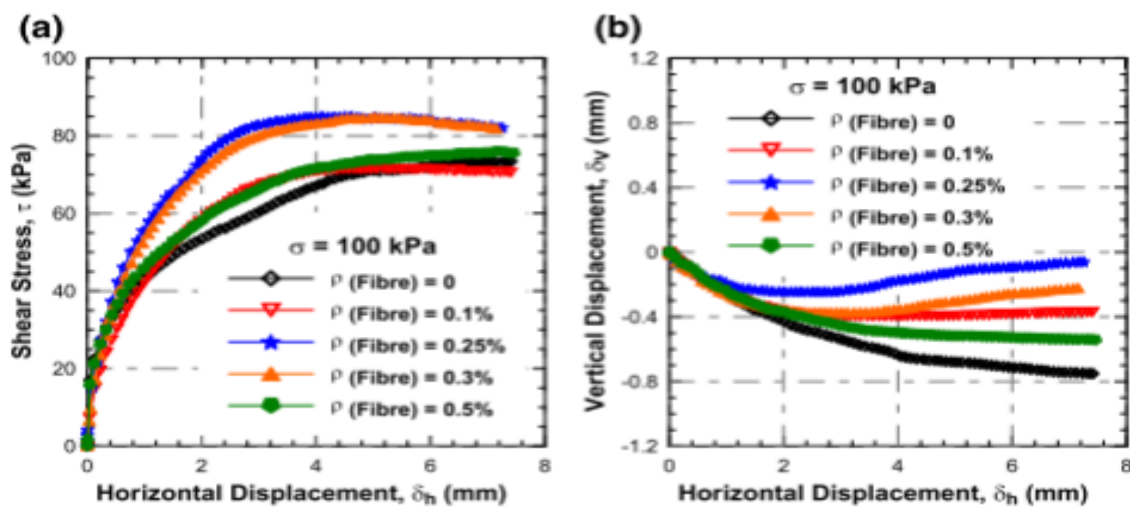


Figure 2.22: Résistance au cisaillement du sable propre renforcé sous une contrainte de confinement de 100 KPa ($W = 3\%$), (a) contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal, (b) déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal([Aouali et al., 2019](#)).

[Gul et al.\(2023\)](#) a étudié l'effet de teneur en fibre de carbone sur les paramètres intrinsèque d'un sol limoneux, les résultats de cisaillement à la boîte montre que l'ajoute des fibres de carbone entraine un augmentation de cohésion et une légère augmentation de l'angle de frottement interne (Figure 2.23), ce comportement peut s'expliquer par le fait que les

microfibres de carbone courtes occupent les vides dans les échantillons de sol et sont également suffisamment longues pour former un réseau entre les grains de sol, ce qui limite le glissement des particules de sol lorsqu'elles sont soumises à des contraintes. Pour les pourcentages de fibres les plus élevés, il y a une agglomération visible des fibres, ce qui entraîne la formation de cavités de faible densité.

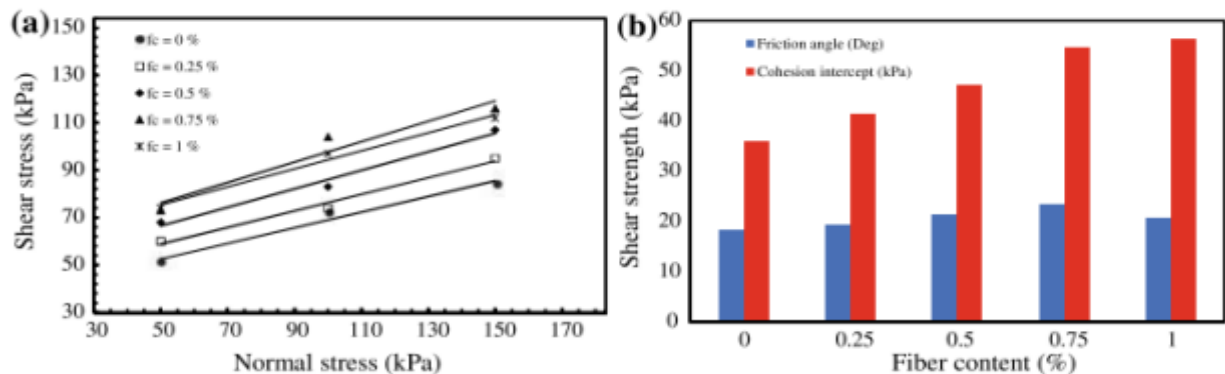


Figure 2.23: L'effet de teneur en fibre de carbone sur la résistance au cisaillement (Gul et al., 2023).

Alhassani (2021) a étudié l'effet de teneur en fibre de palm sur la résistance au cisaillement sous un contrainte de 400 KPa, il a été observé Le comportement du sable est significativement affecté par le renforcement de la fibre de palme. Il est évident que lorsque la teneur en fibres de palme augmente, la résistance au cisaillement s'améliore jusqu'à une teneur en fibres de palme d'environ 1%, au-delà de laquelle elle diminue. De plus, la déformation associée au pic de contrainte de cisaillement est augmentée par l'augmentation de la teneur en fibres de palme (Figure 2.24).

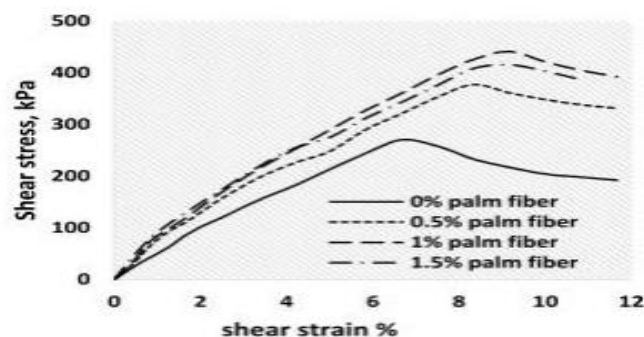


Figure 2.24: Relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation de cisaillement à différentes teneurs en fibres (Alhassani, 2021)

Taha et al. (2020) ont étudié l'effet de l'ajout de fibres de PP d'une longueur de 12 mm et d'une teneur de 0,75 à 3 % sur le comportement mécanique du sol argileux. Comme résultat des tests, ils ont constaté que lorsque la teneur en fibres augmente, l'indice de plasticité diminue, et la diminution de l'indice de plasticité augmente la stabilité et l'ouvrabilité du sol. Sur la base des résultats de l'essai de compression triaxiale, ils ont montré que la teneur en fibres augmente la valeur de l'angle de frottement interne et que la valeur de la cohésion diminue. Ils ont également indiqué que l'angle de frottement interne maximal et les valeurs de cohésion minimales ont été obtenus à une teneur en fibres de 3 %. D'après les résultats des tests de consolidation, ils ont conclu que le taux de vide, le coefficient de consolidation et la conductivité hydraulique du sol diminuaient avec l'augmentation de la teneur en fibres.

2.7.2.3 Effet de la longueur des fibres

Diambra et Ibraim (2015) à montrer que la longueur des fibres joue un rôle majeur dans le mécanisme d'interaction, mais la longueur réelle des fibres doit être au moins dix fois supérieure à la taille moyenne des grains pour assurer le déclenchement du mécanisme d'interaction.

Ganiev et al.(2022) a étudié l'effet et la contribution des fibres avec des essais triaxiaux de type CD. La figure 2.25 montre la relation entre le rapport de contrainte (η) et la déformation axiale (ϵ_a). Il est constaté que lorsque la longueur du matériau de renforcement diminue, les valeurs du rapport de contrainte résiduelle diminuent également ($\eta = 1,52$) pour une fibre de 0,2% d'une longueur de 12 mm, $\eta = 1,48$ pour une fibre de 0,2% d'une longueur de 6 mm, $\eta = 1,43$ pour une fibre de 0,2% d'une longueur de 3 mm, et $\eta = 1,34$ pour une fibre de 0%).

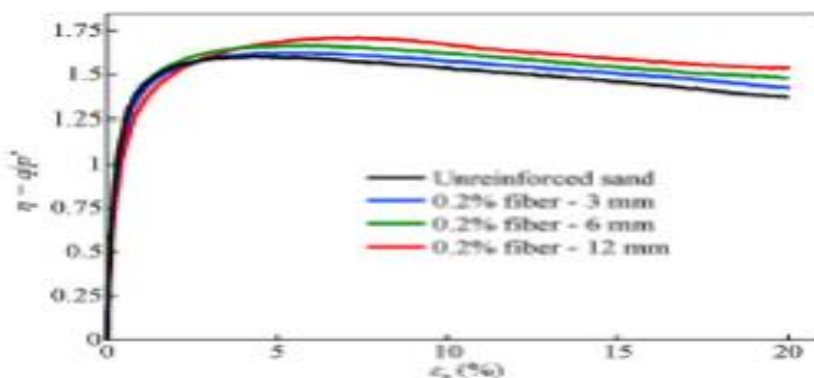


Figure 2.25: Influence de la longueur des fibres sur le rapport de contrainte (paramètre de la ligne d'état critique).(Ganiev et al., 2022)

Yazici & Keskin (2024) ont étudié le comportement d'un sol argileux renforcé par des fibres de polypropylène de différents teneurs et longueurs, lors d'un essai de compression triaxiale. La figure 2.26 présente l'effet de la longueur des fibres (L) sur le déviateur de contrainte des éprouvettes de sol renforcé. Les résultats montrent que la longueur des fibres a une influence significative sur la résistance des éprouvettes. Le déviateur augmente avec la longueur des fibres pour toutes les pressions de confinement et tous les pourcentages de fibres. La plupart des améliorations significatives de la contrainte déviatorique par rapport au sol non renforcé se sont produites dans les éprouvettes contenant des fibres PP de 19 mm à une teneur de 0,20 %. La teneur et la longueur des fibres influent de manière directe sur l'interaction entre les fibres et les particules de sol dans le composite fibre-sol. La surface de contact entre les fibres et les particules de sol est relativement faible dans le composite fibre-sol contenant moins que la quantité optimale de fibres

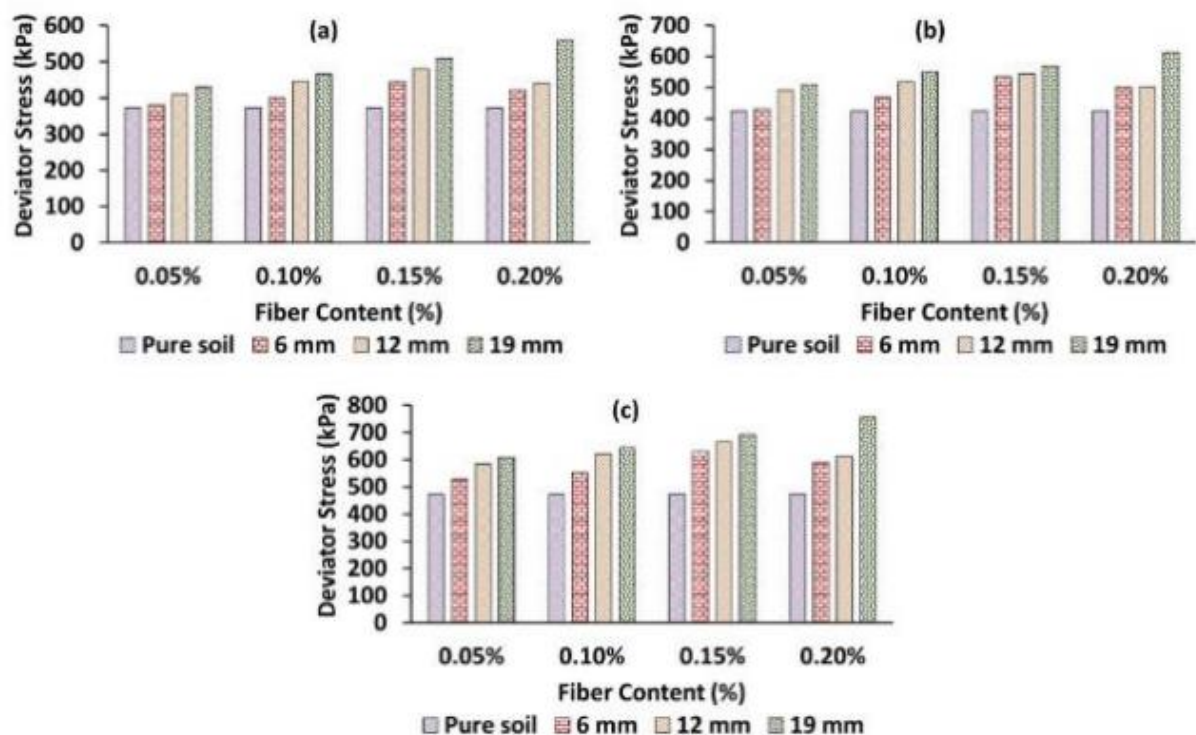


Figure 2.26: Effet de la longueur des fibres sur la contrainte déviatorique pour a 50 KPa, b 100 KPa, et c 200 KPa. (Yazici & Keskin, 2024)

2.8 Applications de renforcement des sols par l'utilisation des fibres

Les techniques de renforcement par fibres sont de plus en plus populaires dans le domaine de l'ingénierie géotechnique pour améliorer les propriétés mécaniques du sol. Ces techniques

Chapitre II Traitement de sol avec ciment et poudre de brique et renforcement par fibre de polypropylène

consistent à ajouter des fibres discrètes, synthétiques (polypropylène, polyester, etc.) ou naturelles (coco, jute, etc.), au sol pour en améliorer la rigidité, la stabilité et la résistance à la déformation. Le matériau composite qui en résulte est bien adapté à des applications telles que la stabilisation des pentes, la construction des remblais et les chaussées ([Sanjay Kumar Shukla, 2017](#)). Le renforcement par des fibres augmente la capacité portante du sol, réduit le tassement et améliore la résistance au cisaillement, offrant ainsi une solution durable pour les conditions de sol les plus complexes. En raison de leur résistance élevée à la rupture et à l'érosion, les sols renforcés par des fibres contribuent à la durabilité à long terme des ouvrages géotechniques. Grâce à sa facilité de mise en œuvre, sa rentabilité et sa compatibilité, le renforcement par fibres est une solution prometteuse pour les projets d'ingénierie géotechnique modernes. La figure 2.27 ci-dessous montre les applications possibles des sols renforcés par des fibres (murs de soutènement, semelles, barrages, etc.).

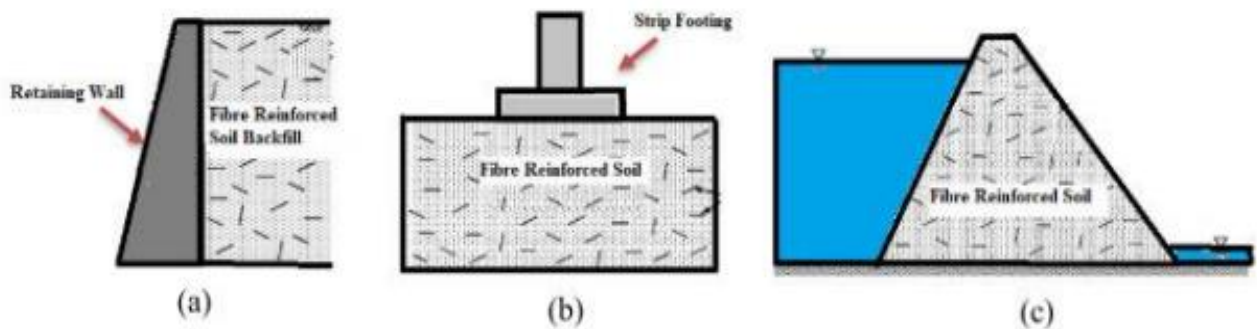


Figure 2.27: Applications du sol renforcé par des fibres : (a) un mur de soutènement, (b) une semelle isolée, (c) un barrage de type « digue » (petit barrage construit en travers d'un bassin de rétention, d'une rigole ou d'un canal pour réduire la vitesse de l'écoulement).([Safdar et al., 2022](#)).

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre il a été présenté les différentes méthodes d'amélioration des sols, les différents matériaux servant comme moyen de traitement et de cimentation, comme le ciment, la chaux, la pouzzolane...etc.

Aussi, il a été exposé les méthodes de renforcement des, notamment par fibres de différentes natures (naturelles et artificielles). Aussi une synthèse bibliographique a été incluse dans ce chapitre comprenant les recherches menées pour étudier l'effet de l'inclusion des fibres sur le comportement et les caractéristiques du sol.

La majorité des résultats ont indiqué une amélioration de la résistance des sols et leurs caractéristiques avec l'ajout de différents types de fibres à une certaine teneur.

Cependant l'impact sur l'environnement pourrait jouer un rôle déterminant dans le choix du type de fibre à utiliser pour renforcer le sol.

Dans le chapitre suivant, on va exposer le dispositif expérimental, la procédure utilisée et les caractéristiques du sol de base ainsi que celles des fibres utilisées pour renforcer le sol, le ciment et la poudre de brique qui sera utilisée comme au ciment pour le traitement des sols.

Chapitre 3: Dispositif Expérimentale et Mode Opérateur

3.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter la démarche expérimentale ainsi que le mode opératoire utilisé au laboratoire pour bien étudier la nature du sol et celle du liant utilisé comme stabilisant ainsi que la nature des fibres employées. Donc pour étudier correctement les propriétés d'un sable cimenté et traité partiellement par des déchets de brique en poudre et renforcé avec des fibres de polypropylène, on devra faire appel aux caractéristiques de ses constituants.

Une série de tests expérimentaux ont été effectués sur du sable traité non renforcé et du sable traité et renforcé par fibres. Le premier objectif étant d'analyser les caractéristiques du sable traité, le second a pour but d'étudier l'influence du ciment et de la poudre de brique, et la fibre sur le comportement observé à l'aide d'un appareillage classique existant au laboratoire de la faculté de Génie civil et d'Architecture (Université Hassiba Benbouali Chlef) : l'appareil de cisaillement rectiligne à la boîte de Casagrande.

3.2. Matériaux utilisés

3.2.1. Sable de Chlef

Le sable utilisé dans l'étude est prélevé des berges de Oued Chlef (Algérie) sous la forme d'un sable naturel lâche car extrait de couches superficielles, de faible portance exposé aux phénomènes naturels comme la liquéfaction engendrée par le séisme. Compte tenu de l'humidité du sable utilisé, nous avons pris les précautions de bien sécher le matériau à l'étuve à une température de 105° pendant 24 heures puis tamisé à travers un tamis de 2 mm (Figure 3.2). Les particules de sable de couleur beige clair, d'une forme de grain quasi arrondi ; selon USCS le sable de Chlef est classé comme un matériau bien gradué avec une granulométrie serrée. La distribution de taille des grains est présentée dans la Figure 3.1

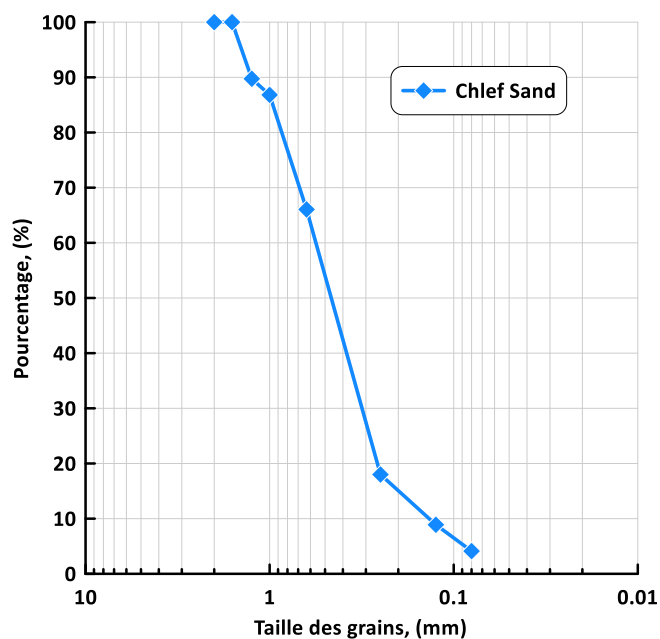


Figure 3.1 : Analyse granulométrique de sable de Chlef



Figure 3. 2 : a) Sable de Chlef ; b) Microscope électronique à balayage (SEM) Vue de sable testé : Affichage de la taille de particule et la forme de sable de Chlef, (Belkhatir et al. 2010).

La Figure 3.2b montre une vue réalisée au microscope électronique à balayage du sable testé. Les propriétés physiques du sable sont données dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Caractéristiques physiques du sable de Chlef

Matériaux	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	D _{max} (mm)	GS	D ₅₀ (mm)	Cu	Cc	e _{min}	e _{max}
Sable	0.14	0.31	0.56	2	2.688	0.46	4.1	1.3	0.64	1.05

3.2.2. Fibre de renforcement

La fibre synthétique utilisée est une fibre polypropylène qui sert de renfort pour les matériaux composites et a prouvé un comportement satisfaisant (Bouaricha, 2018). Les caractéristiques physico- mécaniques de la fibre sont résumées dans le tableau 3.2.

Dans la présente étude, il a été choisi les fibres de polypropylène. Les teneurs en fibres utilisées dans les mélanges sont respectivement : 0.10% ;0.20% et 0.30%.

Tableau 3.2: Caractéristiques physico-mécaniques de la fibre de polypropylène (Missoum Benziane.M ;2021)

Propriétés	Unite	Fibre de Polypropylène
Couleur	[–]	Blanc
Longueur	[mm]	12
Diamètre	[μm]	25
Densité spécifique	[–]	0.91
Résistance à la traction	[MPa]	700
Module de Young	[GPa]	14

3.2.3. Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est le ciment de Chlef CEM II / A type de 42.5classe, de densité 3.1 et de surface spécifique 3298 cm^2 / g . La fumée de silice utilisée dans le ciment et de 8%, selon la norme EN 13263-1, ayant pour densité 2,4 et d'une surface spécifique 220000 cm^2 / g , (Figure 3.3). Les caractéristiques Physique chimiques et minéralogiques du ciment sont illustrées dans les Tableaux 3.3 et 3.4 ainsi que la courbe d'analyse granulométrique de ciment dans la figure 3.3.

Tableau 3. 3 : Propriétés chimiques et minéralogiques du ciment.

compositions chimiques	CEM II / A	Composition minéralogique	
SiO ₂	20,58	C3S	57,79
Al ₂ O ₃	4,9	C2S	20,47
Fe ₂ O ₃	4,7	C3A	7,2
CaO	62,8	C4AF	11,49
SO ₃	2,28		
MgO	0,53		
K ₂ O	0,42		
Na ₂ O	0,12		
CaO libre	2,17		

Tableau 3.4 : Propriétés physique de ciment

Propriétés	Valeur
Densité spécifique(g/cm ³)	3.1
Diamètre médian D50 (Microns)	0.122
Surface spécifique (cm ² /cm ³)	4.97E+05
D10(Microns)	0.0787
D60(Microns)	0.133

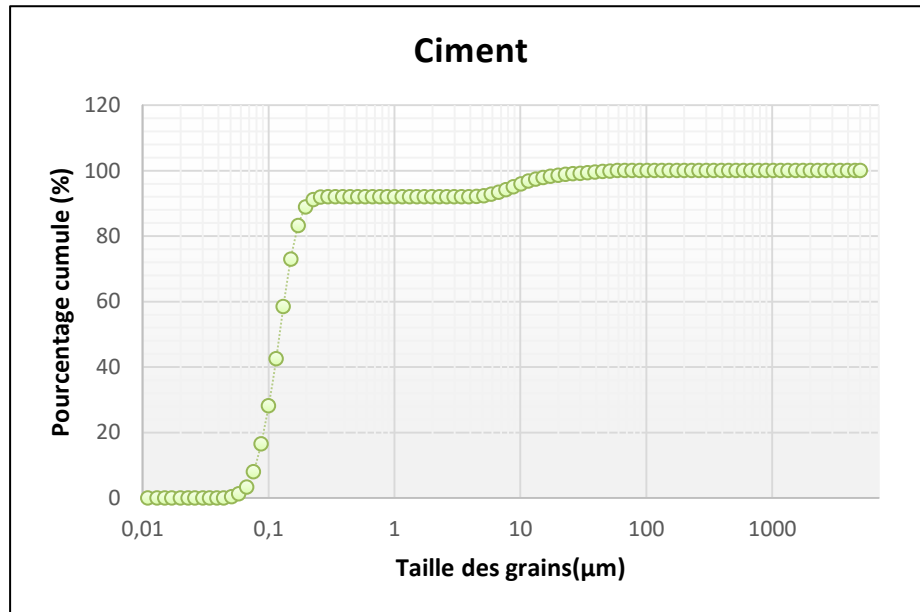


Figure 3.3 :Analyse granulométrique a laser dU ciment

3.2.4. Poudre de brique

Les déchets de briques utilisés dans cette étude ont été collectés dans une décharge de déchets de construction de la région de Chlef. Ils ont d'abord été nettoyés à l'eau pour éliminer les résidus de poussière, puis séchés au four à 105 °C pendant 24 heures.

Le processus de broyage De la brique a été fait à l'aide d'une machine de Micro Duval. Les billes de charge abrasives sont placées à l'intérieur du broyeur où elles sont broyées et décomposées par les cylindres rotatifs à l'intérieur de l'appareil. L'objectif de cette opération est d'obtenir des particules de taille spécifique et uniforme, et le Micro Duval se distingue par sa capacité à broyer efficacement et rapidement le matériau en question. Après avoir extrait la matière, elle a été soumise à un processus de tamisage à l'aide d'un tamis ayant une ouverture de maille de 0,08 millimètres. Cette étape permet de séparer les particules de taille supérieure à 0,08 mm, assurant ainsi une granulométrie précise et uniforme du produit final.

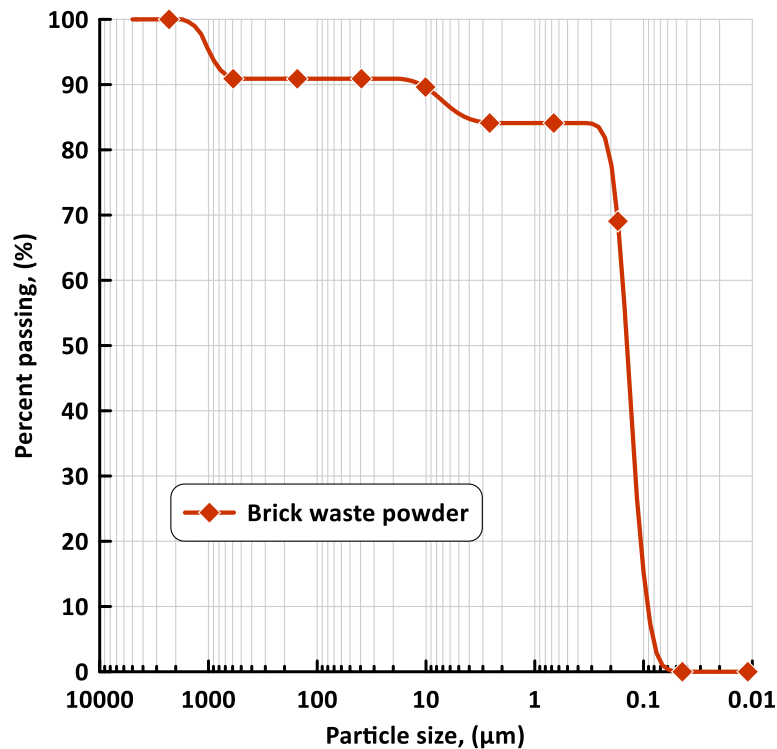


Figure 3.4 : granulométrie a laser de déchet de brique en poudre (BWP)

Tableau 3.5 : Propriétés physique de poudre de brique

Propriétés	valeur
Densité spécifique(g/cm ³)	2.684
Diamètre médian D50 (Microns)	0.142
Surface spécifique(cm ² /cm ³)	4.03E+05
D10(Microns)	0.091
D60(Microns)	0.156

3.3. Préparation des échantillons

Des échantillons de sable non renforcé et renforcé reconstitués en laboratoire traité avec du ciment et de déchet de brique en poudre ont été utilisés dans cette étude. La préparation des échantillons a été effectuée en déterminant d'abord le poids requis de sable, de ciment ; de déchet de brique en poudre et de fibre de polypropylène pour le mélange. La teneur de ciment (Cc) ; de déchet poudre de brique (BWP) et de fibre de polypropylène incluses dans un composite (sable + ciment +BWP+PP) est définie en pourcentage de poids sec de sable.

Les symboles W_c , W_s ; W_b et W_{pp} seront utilisés et représenteront respectivement le poids de ciment, du sable sec, de poudre de brique et le poids de fibre de polypropylène. Le sable séché au four puis tamisé à 2 mm a été ajouté et mélangé avec de ciment ; de brique en poudre et de fibre de polypropylène

Dans cette étude, 36 essais à la boîte de cisaillement direct ont été réalisés sur du sable traité avec différentes teneurs en ciment de 2,5 ; 5 et 10 % en masse de sol sec ainsi que plusieurs teneurs de déchets de briques selon une ratio de 1:8 en masse de ciment comme taux de substitution afin d'étudier le comportement mécanique d'un sable traité par ciment et poudre de brique, ensuite un renforcement en fibre de polypropylène est ajouté à l'ensemble sable+ciment+dechet de brique en poudre.

Une série d'essais sur des échantillons non traités a également été accomplie pour fournir une base de comparaison et évaluer l'effet du traitement et 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 une densité relative initiale de 80% représente l'état dense avec une teneur en eau de 10%

3.4. Essais de caractérisation des matériaux

3.4.1 Détermination de la masse volumique des grains solides d'un sol en utilisant la méthode du pycnomètre à eau

- Cette méthode s'applique à tout échantillon de sol dont le diamètre maximal (d_{max}) des grains solides est inférieure à 2 mm.
- L'essai détermine la masse volumique moyenne d'un échantillon composé de particules, parfois de nature différente.
- La masse volumique des particules solides d'un sol est utilisée pour connaître l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité.

3.4.1.1. Principe de l'essai

La masse des particules solides est obtenue par pesage. Le volume est mesuré au pycnomètre.

L'échantillon de sol est séché à l'étuve puis pesé. Le volume des particules est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides.

3.4.1.2. Équipements nécessaires

- Pycnomètre muni d'un bouchon ;
- Eau distillée

- Une balance dont les portées minimale et maximale sont compatibles avec les masses à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de $\pm 1/1000$ de la valeur mesurée
- Un tamis à maille carrée de 2 mm d'ouverture.
- Des éprouvettes de volume 250 cm³ munis de bouchons



Figure 3.5 : Pycnomètre + Balance

3.4.1.3. Mode opératoire

- Peser une petite quantité de sol sec (environ 25 g) dont on veut déterminer la masse volumique ;
- Peser le pycnomètre et son bouchon qui doivent être propres et secs (m_1) ;
- Introduire la prise d'essai dans le pycnomètre et puis le peser avec son bouchon (m_2) ;
- Remplir le ballon du pycnomètre avec de l'eau distillée et puis éliminer les bulles d'air par dépression ou par ébullition ;
- Compléter le remplissage du pycnomètre avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge et puis peser le pycnomètre avec son bouchon (m_3) ;
- Vider et nettoyer le pycnomètre ;
- Remplir le pycnomètre avec l'eau distillée jusqu'au trait de jauge et puis le peser avec son bouchon (m_4) ;
- Calculer la masse volumique des grains solides en utilisant la formule suivante :

$$\rho_s = \frac{\rho_w ((m_2 - m_1))}{(m_4 + m_2 - m_1 - m_3)} \quad (\text{g/cm}^3)$$

3.4.2. Analyse granulométrique par tamisage

L'essai consiste à fractionner un matériau en plusieurs classes granulaires au moyen d'une série des tamis emboîtables les uns dans les autres dont les ouvertures diminuent du haut vers le bas et à peser le refus cumulé sur chaque tamis.

3.4.2.1. Équipements nécessaires

- Une série de tamis métalliques emboîtables : chaque tamis est composé d'une toile métallique de mailles carrées dont l'ouverture est déterminée. La série de tamis utilisés pour l'analyse granulométrique du sable (0,08 - 0,125 - 0,25 - 0,63 - 0,8 - 1 - 1,25 - 2 mm). Les tamis doivent avoir le même diamètre.
- Fond et couvercle : Ils ont le même diamètre que les tamis.
- Tamiseuse : c'est un appareil électrique qui sert à agiter et vibrer la série de tamis empilés (figure 3.6).
- Balance
- Étuve : sert à sécher les matériaux



Figure 3.6 : série de tamis

3.4.2.2. Mode opératoire

- Laver puis sécher le matériau qu'on veut analyser (sable) ;
- Prendre une quantité de matériau sec (M_t). La masse M_t de l'échantillon à analyser doit être supérieure à $0,2 D$ et inférieure à $0,4 D$, avec M_t en kg, D est la plus grande dimension spécifiée en mm ;
- Placer la série des tamis convenable dans la machine à tamiser d'une manière ordonnée de sorte que l'ouverture des tamis diminue du haut vers le bas. Le fond doit être placé à la base de la série ;
- Verser le matériau lavé et séché dans la colonne de tamis ;

- Faire marcher l'appareil à vibrer pendant 7 à 15 min (généralement, on peut considérer qu'un tamisage est terminé lorsque le refus sur un tamis ne se modifie pas de plus de 1 % en une minute de tamisage) ;
- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille. Soit R1 la masse de ce refus ;
- Peser le refus cumulé pour les autres tamis, un par un de haut vers le bas (R2, R3, ... Rn) ;
- Peser le tamisât au dernier tamis, Soit Tn sa masse.

3.4.2.3. Expression des résultats

- Calculer le pourcentage de refus cumulé dans chaque tamis, où les masses des différents refus cumulés Ri sont rapportées à la masse totale de l'échantillon sec (Mt).

$$Ri (\%) = \frac{Ri}{Mt} \times 100$$

- Calculer les pourcentages de tamisats cumulés correspondants comme suit :

$$Ti (\%) = 100 - Ri (\%)$$

- Tracer la courbe granulométrique :

En abscisse : les dimensions des mailles ou les ouvertures des tamis, sur une échelle logarithmique.

En ordonnée : les pourcentages de tamisats cumulés sur une échelle arithmétique.

3.4.3. Détermination des masses volumiques sèches minimale et maximale des sables

3.4.3.1. Équipement nécessaire

- Une balance ;
- Une règle à araser ;
- Un moule cylindrique rigide de volume connu. Les dimensions du moule choisi dépendent de la taille des plus grosses particules du matériau. Pour les matériaux ayant un diamètre maximal des grains inférieure à 5 mm ($d_{max} < 5 \text{ mm}$), il est préférable d'utiliser un moule de 100 mm de diamètre ;
- Hausse du moule adaptable avec le moule ;
- Un entonnoir de grande forme pour qu'il puisse contenir suffisamment de sable pour remplir le moule. L'extrémité de l'entonnoir est attachée avec un tube dont le diamètre doit être inférieur à 12.5 mm (pour $d_{max} < 5 \text{ mm}$) ;

- Une dame pour compacter l'échantillon, telle que la dame Proctor ;
- Pinceau ;

3.4.3.2. Préparation de l'échantillon

Après le séchage du sable à tester, il faut le malaxer délicatement afin de l'homogénéiser. Puis, on prend une quantité nécessaire pour l'essai. Pour les matériaux qui ont un diamètre maximal $d_{\max} < 5$ mm, la masse requise doit être supérieure ou égale à 7.5 kg.

3.4.3.3. Mode opératoire

3.4.3.3.1. Détermination de la masse volumique minimale

- Peser le moule choisi ;
- Placer l'entonnoir dans l'axe du moule et assurer que la base du tube est en contact avec le fond du moule (voir figure 3.7) ;
- Verser dans l'entonnoir une quantité de sable suffisante pour remplir le moule et former un excédent conique au-dessus du niveau supérieur de moule ;
- Déposer toute la quantité de sable en soulevant l'entonnoir verticalement tout en maintenant la hauteur de chute quasi-nulle, et jusqu'à ce que l'entonnoir soit vide (voir figure 3.7) ;
- Retirer le sable surmontant le niveau supérieur du moule à l'aide d'une règle à araser tout en évitant la densification du sable ;
- Nettoyer la surface extérieure du moule à l'aide d'un pinceau ;
- Peser le moule et son contenu ;
- L'essai comprend au moins cinq prises d'essai ;

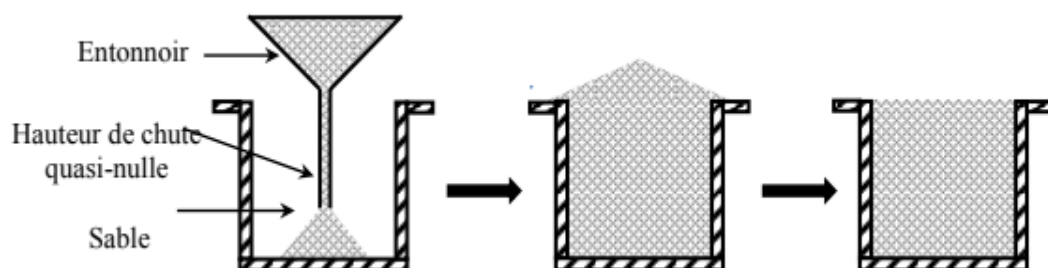


Figure 3.7 : Méthode de déposition du sable utilisée pour déterminer sa masse volumique minimale.

3.4.3.3.2. Détermination de la masse volumique maximale

- Peser le moule (le même moule utilisé pour la détermination de la masse volumique minimale) ;
- Monter la hausse cylindrique sur le moule ;
- Déposer le sable sec en couches jusqu'à ce que le niveau supérieur du moule soit dépassé. En utilisant une dame rigide (comme la dame Proctor), chaque couche subit 25 coups, 24 coups circulaires le long de son périmètre et un coup au milieu (voir figure 3.8) ;
- Retirer la hausse cylindrique ;
- Retirer le sable surmontant le niveau supérieur du moule en utilisant une règle à araser
- Nettoyer la surface extérieure du moule à l'aide d'un pinceau ;
- Peser le moule et son contenu ;
- L'essai doit comporter au moins deux prises d'essai.

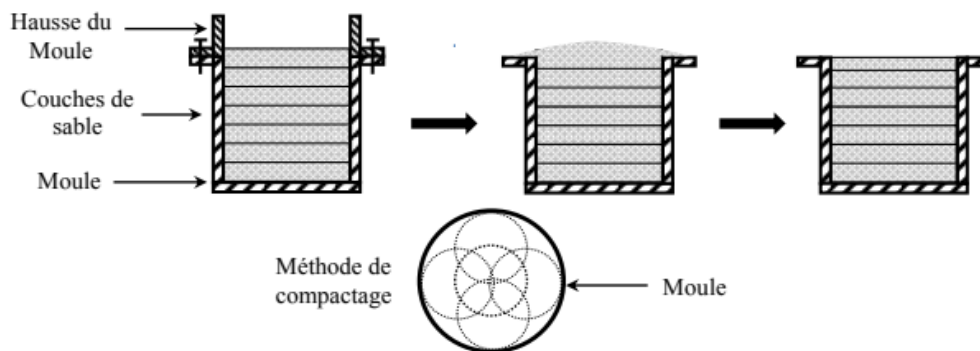


Figure 3.8 : Méthode de déposition du sable utilisée pour déterminer sa masse volumique maximale.

La masse volumique sèche du sable est calculée comme suit :

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_m} \quad \text{et} \quad m_d = m - m_m$$

où :

ρ_d est la masse volumique sèche ; m_d est la masse du sable sec ; m_m est la masse du moule ; m est la masse du moule et son contenu ; V_m est le volume du moule.

La valeur finale de la masse volumique sèche minimale (ρ_{dmin}) du sable est la moyenne des valeurs de ρ_{dmin} obtenues. De même, il faut calculer la moyenne des valeurs de ρ_{dmax} pour obtenir la valeur finale de la masse volumique sèche maximale du sable.

En utilisant les valeurs finales des masses volumiques sèches minimale et maximale, il est possible de déduire les indices des vides minimal et maximal comme suit:

$$e_{\min} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{d\max}} - 1 \quad \text{et} \quad e_{\max} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{d\min}} - 1$$

Où :

$e_{\min}$ est l'indice des vides minimale ; $e_{\max}$ est l'indice des vides maximale ; γ_s est la masse volumique des particules solides.

3.5. Essai à la boîte de cisaillement

3.5.1. Principe de l'essai

La boîte à échantillons est une boîte carrée de 60x60 mm composée de deux demi-boîtes. La hauteur initiale est de 25 mm. Lors de l'essai, l'échantillon est placé dans la boîte et soumis à une charge verticale N , normale au plan de cisaillement. Cette charge est appliquée à la partie supérieure de l'échantillon et reste constante pendant toute la durée de l'essai, représentant la contrainte normale σ_n (50, 100 et 200 kPa) appliquée à l'aide de poids. Après consolidation, une force horizontale T est appliquée à l'une des demi-boîtes à l'aide d'un système de motorisation. La demi-boîte glisse sur l'autre à vitesse constante ($V = 1$ mm/min) dans un mouvement en direction de leur plan de séparation jusqu'à la fin de l'essai avec un déplacement relatif ΔL . La force horizontale T nécessaire pour assurer ce déplacement est mesurée en fonction de ΔL .

3.5.2. Dispositif expérimental

L'appareil de cisaillement Casagrande est utilisé pour réaliser des essais de cisaillement sur des échantillons de sol remaniés ou reconstitués. Cet essai permet de contrôler les grandes déformations et de déterminer les valeurs de cisaillement résiduelles, en particulier dans les glissements de terrain, sur la base d'un plan de cisaillement prédéterminé. L'objectif de ce test est d'étudier la résistance au cisaillement des sols dans un plan horizontal bien déterminé. Il permet de déterminer les caractéristiques mécaniques du cisaillement, telles que la cohésion (C) et l'angle de frottement (ϕ).

Les travaux de recherche présentés dans cette étude ont été effectués au Laboratoire de mécanique de sol de la faculté de Génie Civil et d'Architecture (Université de Chlef), à l'aide d'un équipement de cisaillement direct DIGISHEAR (CONTROLS). L'équipement se

compose de deux cadres métalliques indépendants séparés par un plan de cisaillement, avec un cadre supérieur fixe et un cadre inférieur mobile qui applique la force de cisaillement (voir figure 3.9).



Figure 3.9: Boîte de cisaillement direct utilisée

3.5.3. Mode opératoire

L'échantillon de sol est cisailé par le dispositif de cisaillement direct, qui nécessite de placer l'échantillon entre deux demi-boîtes. Deux pierres perméables sont fixées à l'échantillon, aux extrémités inférieure et supérieure (figure 3.10)



Figure 3.10: les deux demis boîtes utilisées

Ce dispositif est utilisé pour tester des échantillons de taille moyenne mesurant 60 mm de longueur, 60 mm de largeur et 25 mm de hauteur. Tous les essais ont été réalisés à une vitesse de cisaillement de 1,00 mm/min. L'échantillon est cisailé le long d'un plan imposé, où une force normale (N) et une force tangentielle (T) sont appliquées. La partie inférieure peut se déplacer horizontalement à une vitesse constante. Le plan qui sépare les deux demi-boîtes agit comme un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'échantillon. L'essai donne les caractéristiques mécaniques le long d'une surface de rupture spécifiée, et la force de cisaillement totale est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte

supérieure. La vitesse de cisaillement est transmise à la machine par l'intermédiaire d'un afficheur, les lectures sont effectuées manuellement. En exécutant le test plusieurs fois avec différentes valeurs de contrainte normale, nous pouvons déterminer la cohésion du sol (C) et l'angle de frottement (ϕ).

3.5.4. Préparation des échantillons

Des échantillons de sable non renforcés et renforcés reconstitués en laboratoire traité avec du ciment et des déchets de brique en poudre ont été utilisés dans cette étude. La préparation des échantillons a été effectuée en déterminant d'abord le poids requis de sable, de ciment ; de déchet de brique en poudre et de fibre de polypropylène pour le mélange. La teneur de ciment (Cc) ; de déchet poudre de brique (BWP) et de fibre de polypropylène incluses dans un composite (sable + ciment +BWP+PP) est définie en pourcentage de poids sec de sable.

Les poids utilisés W_c , W_s ; W_b et W_{pp} représentent respectivement le poids de ciment, du sable sec, de poudre de brique et le poids de fibre de polypropylène. Le sable séché au four puis tamisé à 2 mm a été ajouté et mélangé avec du ciment ; de brique en poudre et de fibre de polypropylène.

Dans cette étude, 36 essais à la boîte de cisaillement direct ont été réalisés sur du sable traité avec différentes teneurs en ciment de 2,5 ; 5 et 10 % en masse de sol sec ainsi que plusieurs teneurs de déchets de briques selon une ratio de 1:8 en masse de ciment comme taux de substitution afin d'étudier le comportement mécanique d'un sable traité par ciment et poudre de brique, un renforcement en fibre de polypropylène est ajouté à l'ensemble sable+ciment+dechet de brique en poudre.

Une série d'essais sur des échantillons non traités a également été accomplie pour fournir une base de comparaison et évaluer l'effet du traitement et 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 une densité relative initiale de 80% représentant l'état dense avec une teneur en eau de 10%.

Le test consiste à placer une masse spécifique dans un volume spécifique. Pour que les résultats soient exacts, la masse calculée doit correspondre au volume de l'échantillon, Le calcul de la masse est déterminé sur la base de la densité relative initiale (D_r) à l'aide de l'équation suivante :

$$m_s = \frac{(V T + \gamma S)}{(1 + e_{max}(1 - D_r) + D_r \times e_{min})}$$

Où : V_T : Volume total d'échantillon ;

γ_s : Poids volumique des grains solide ;

e_{max} : Indice des vides maximal ;

e_{min} : Indice des vides minimal;

Dr : Densité relative initiale.

Les résultats d'essais sont représentés sous forme de courbes de :

- Contrainte de cisaillement en fonction des déplacements horizontaux : $\tau = (\Delta H)$;
- Déplacements verticaux en fonction des déplacements horizontaux : $\Delta V = (\Delta H)$;
- Contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale $\tau = (\sigma N)$

3.6. Préparation des matériaux et mode opératoire

La première série réalisée comporte 9 essais sur un mélange de sable-ciment – poudre de brique avec une teneur en ciment égale $C_c = 2.5\%$, 5% , et 10% . et une teneur de brique correspondante a un ratio $1/8$, et une teneur en eau de 10% . La densité relative (Dr) prise dans ce cas d'étude est caractérisée par un sol dense ($Dr = 80\%$). Les échantillons ont été cisailés et soumis à trois contraintes normales à savoir : $\sigma_n = 50, 100$ et 200 kPa. Les échantillons sont placés dans une étuve à une température de $26^\circ \pm 2$ pour une durée de cure de 7 jours.

La masse du ciment est définie comme le rapport de la teneur en ciment au poids sec de sable, selon l'équation 2.1 suivante :

$$W_c = W_s \times C_c(\%) \dots\dots\dots 2.1$$

La masse de poudre de brique est définie comme le rapport, selon l'équation 2.2

$$W_b = W_s \cdot \frac{1}{8} C_c(\%) \dots\dots\dots 2.2$$

Chaque échantillon a été préparé en trois couches (Figure 3.11).

La masse de chaque couche est déterminée en fonction de la valeur de la densité relative (Dr). Chaque couche est versée dans le moule puis compactée manuellement, le nombre de coups est de 25 jusqu'à obtention de la hauteur désirée pour les essais denses. Le tableau 3.6 illustre notre programme d'essais associé à l'étude.

Tableau 3. 6: Programme expérimentale de traitement avec ciment et poudre de brique.

Type des échantillons	Contrainte Normal (kpa)	Sable (%)	Teneur en ciment (%)	Teneur en Brique (%)	Teneur en eau (%)	Temps de cure	Nombre D'essais
Sable non-traite non-renforce	50	100	0	0	0	0j	3
	100	97.5	2.1872	0.3128	10	7j	3
	100	95	4.375	0.625	10	7j	3
	200	90	8.75	1.25	10	7j	3
Sable traite non renforce							

La deuxième série d'essais a été réalisée avec un mélange de sable+ciment+ déchet de brique en poudre+ fibre. La teneur en fibre étant égale à PP=0.1% ; 0,2 % et 0.3% de la masse de sable à l'état sec et avec une teneur en eau moyenne $\omega = 10\%$. La densité relative ($Dr = 80\%$). Étant exprimée par la relation suivante :

$$Dr = \frac{e_{min} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

Les échantillons ont été cisailés sous des contraintes normales $\sigma_n = 50, 100, 200$ kPa. Les échantillons ont été conservés dans une étuve à une température $T = 30^\circ \pm 2^\circ$ d'une durée de 7 jours.

Tableau 3.7 : Programme expérimentale de renforcement avec fibre

Type des échantillons	Contrainte Normal (kpa)	Teneur en ciment (%)	Teneur en Brique (%)	Teneur en fibre PP(%)	Temps de cure	Nombre D'essais
Sable traite et renforce	50	2.1872	0,3128	0,1/ 0,2 /0, 3	7j	9
	100	4.375	0,625	0,1/ 0,2 /0, 3	7j	9
	200	8.75	1,25	0,1/ 0,2 /0, 3	7j	9



Figure 3.11 : Echantillon de mélange (sable+ciment+poudre de brique+fibre de polypropylène)

La concentration moyenne de fibre est définie comme un pourcentage du poids sec de sable et sont définis à partir des relations 2.3 suivantes :

$$W_f = W_s.PP(\%) \dots\dots\dots 2.3$$

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre il a été présenté l'appareillage utilisé (Cisaillement) et la procédure de préparation des échantillons de sable, ciment, poudre de brique et de fibres au niveau du laboratoire afin d'étudier le comportement des sables et des mélanges sables-ciment-poudre de brique sables-ciment-poudre de brique – fibre sous divers chemins de chargement.

L'appareil de cisaillement rectiligne à la boîte utilisée nous a permis de procéder à plusieurs essais au sein du laboratoire de génie civil (Université de Chlef) dont les dimensions des échantillons prises sont : 60x60x25mm.

Le mode opératoire suivi a été élaboré d'après des recommandations de différents chercheurs. Il permet de confectionner des échantillons homogènes et de réaliser des essais de bonne qualité.

Les pertinences du dispositif et du mode opératoire ont été vérifiées par des tests de répétabilité.

Ce chapitre décrit également les caractéristiques du sable étudié et les différents ajouts dans la phase préparation et mode opératoire des différents échantillons.

Dans le chapitres suivant une étude du comportement mécanique ces matériaux va être présentée en mettant l'accent sur l'influence de l'ajout du liant hydraulique et les fibres synthétiques sur le comportement des échantillons du sol.

Chapitre IV : Analyse et Discussion des Résultats

4.1. Introduction

Dans le cadre de cette étude expérimentale, des échantillons de sable naturel de Chlef ont été préparés et traités avec une substitution partielle du ciment par de la poudre de brique.

Trois pourcentages de traitement ont été adoptés : 2,5% ; 5% ; 10% .de ciment, dont (1/8) a été remplacé par de la poudre de brique, objectif de cette première phase était d'évaluer l'impact de ce mélange sur les caractéristiques de cisaillement du sol stabilisé. Tous les échantillons ont été compactés à une densité relative de 80 %, avec un même contenu en eau de 10% et une durée de séchage uniforme de 7 jours.

Dans une deuxième phase, les mêmes échantillons traités ont été renforcés par des fibres de polypropylène, ajoutées à des taux de 0,1 .0, 2 et 0,3% en poids. Cette étape visait à étudier l'effet de l'inclusion des fibres sur l'amélioration de la résistance au cisaillement, sous différentes contraintes normales de 50, 100 ,200 kPa.

4.2. Présentation et discussion des résultats

Dans ce paragraphe les différents graphes des résultats obtenus sont représentés, comportant l'évolution des contraintes – déformations, la variation contractance-dilatance, les droites de Coulomb traçant l'enveloppe des cercles de Mohr et qui donnent la variation de la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la contrainte normale.

4.3. Effet de substitution

La Figure 4.1 illustre les résultats des essais de cisaillement direct sur des échantillons non-traités et traités avec une substitution de 1/8 de ciment (C_c+B_{wp}) = 2.5, 5 et 10%. Ces échantillons ont été cisailés sous une contrainte normale de 50 ; 100 et 200 kPa. Les résultats montrent que pour l'échantillon non traité, la résistance augmente avec l'augmentation du déplacement horizontal sans apparition de pic, tandis que pour les échantillons traités avec du (ciment + poudre de brique) on constate que la résistance augmente d'une manière significative avec l'augmentation de la teneur en (ciment + poudre de brique) jusqu'à un pic de résistance puis la résistance chute suivie par une résistance résiduelle jusqu'à la fin de cisaillement.

- ❖ ($W_c + B_{wp}$) = 2,5 % + 0 % Fibres τ_{max} = 98,08 kPa σ_n = 50 kPa
- ❖ ($W_c + B_{wp}$) = 5 % + 0 % Fibres τ_{max} = 133,42 kPa..... σ_n = 50 kPa
- ❖ ($W_c + B_{wp}$) = 10 % + 0 % Fibres..... τ_{max} = 199,36 kPa..... σ_n = 50 kPa
- ❖ ($W_c + B_{wp}$) = 2,5 % + 0 % Fibres τ_{max} = 131,75 kPa σ_n = 100 kPa

- ❖ $(W_c + B_{wp}) = 5 \% + 0 \% \text{ Fibres} \dots\dots\dots \tau_{\max} = 174,00 \text{ kPa} \dots\dots\dots \sigma_n = 100 \text{ kPa}$
- ❖ $(W_c + B_{wp}) = 10 \% + 0 \% \text{ Fibres} \dots\dots\dots \tau_{\max} = 423,78 \text{ kPa} \dots\dots\dots \sigma_n = 100 \text{ kPa}$
- ❖ $(W_c + B_{wp}) = 2,5 \% + 0 \% \text{ Fibres} \dots\dots\dots \tau_{\max} = 195,08 \text{ kPa} \dots\dots\dots \sigma_n = 200 \text{ kPa}$
- ❖ $(W_c + B_{wp}) = 5 \% + 0 \% \text{ Fibres} \dots\dots\dots \tau_{\max} = 229,47 \text{ kPa} \dots\dots\dots \sigma_n = 200 \text{ kPa}$
- ❖ $(W_c + B_{wp}) = 10 \% + 0 \% \text{ Fibres} \dots\dots\dots \tau_{\max} = 559,94 \text{ kPa} \dots\dots\dots \sigma_n = 200 \text{ kPa}$

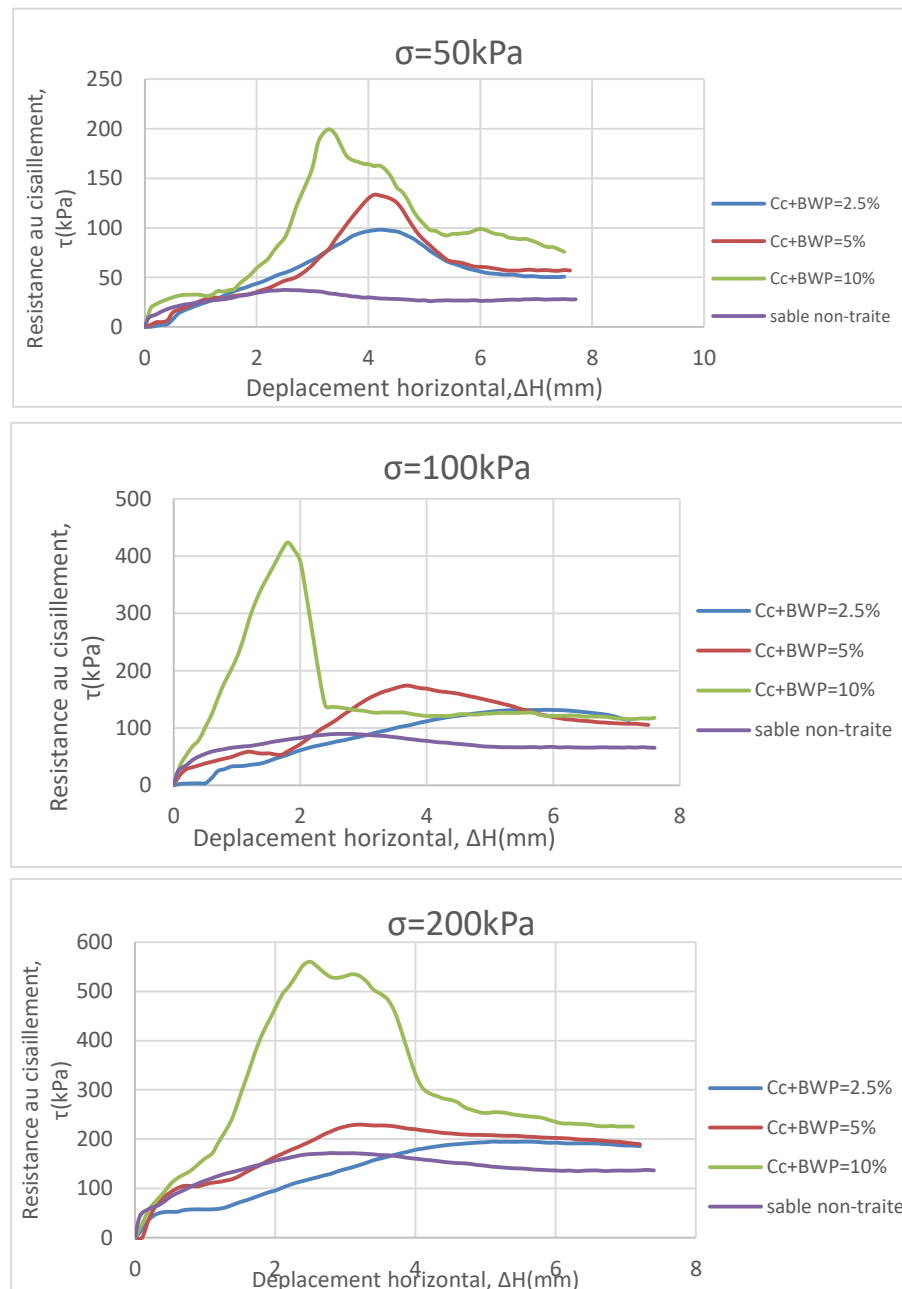
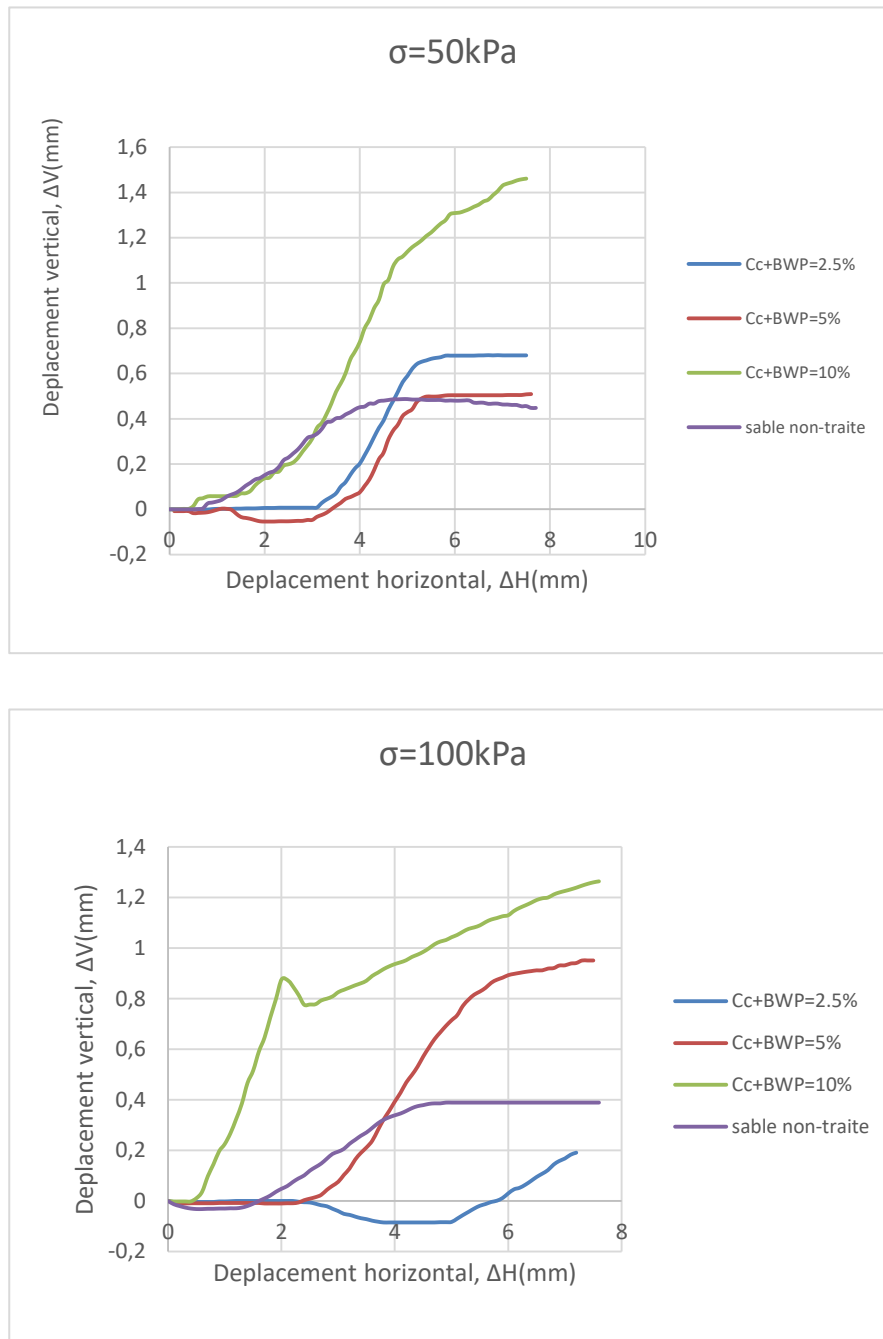


Figure 4.1.: Effet de substitution sur la résistance au cisaillement en fonction de la déformation horizontale avec un confinement de 50 kPa ; 100 kPa ; 200 kPa et une densité $D_r = 80 \%$

la **Figure 4.2** illustre les variations de la déformation verticale en fonction de la déformation horizontale. Les résultats de ces essais montrent l'influence de la teneur en (C_c+B_{wp}) quant à l'augmentation de la phase de dilatance et par conséquent la phase de contractance diminue ceci montre le rôle favorable de la substitution quant à l'augmentation de la cohésion entre les grains du sol.



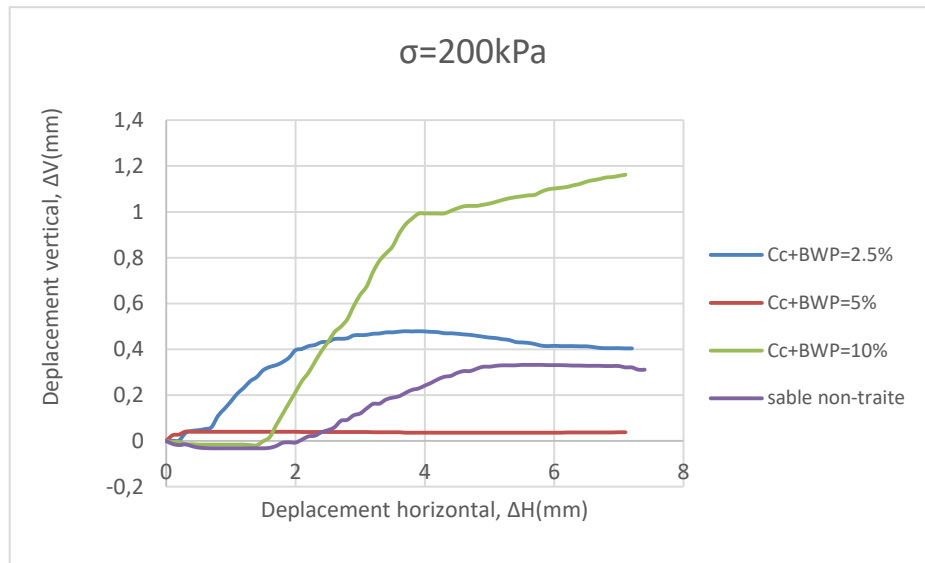


Figure 4.2: Effet de substitution sur la déformation verticale en fonction de la déformation horizontale avec un confinement de 50 kPa ; 100 kPa ; 200 kPa et une densité $Dr = 80\%$

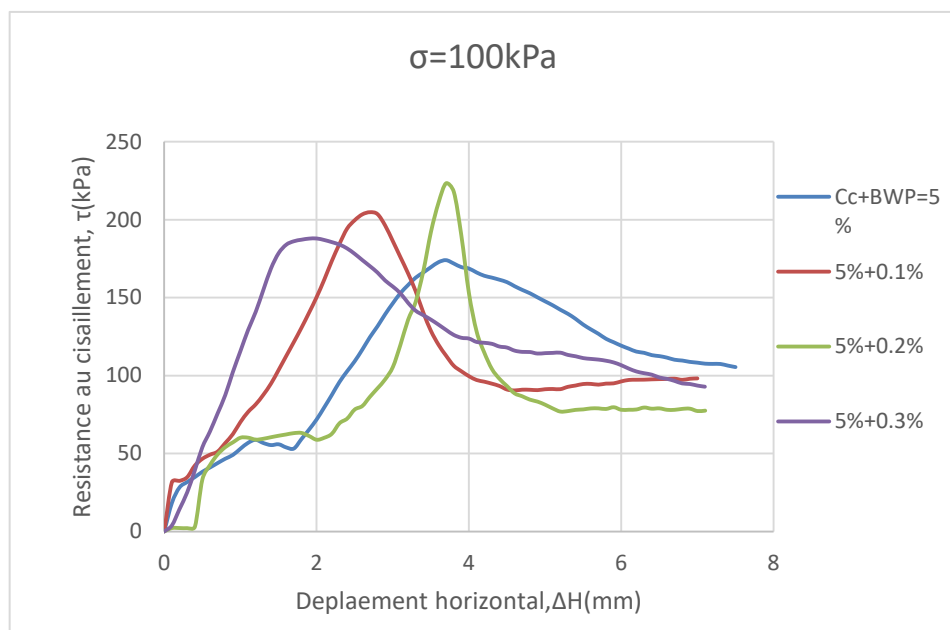
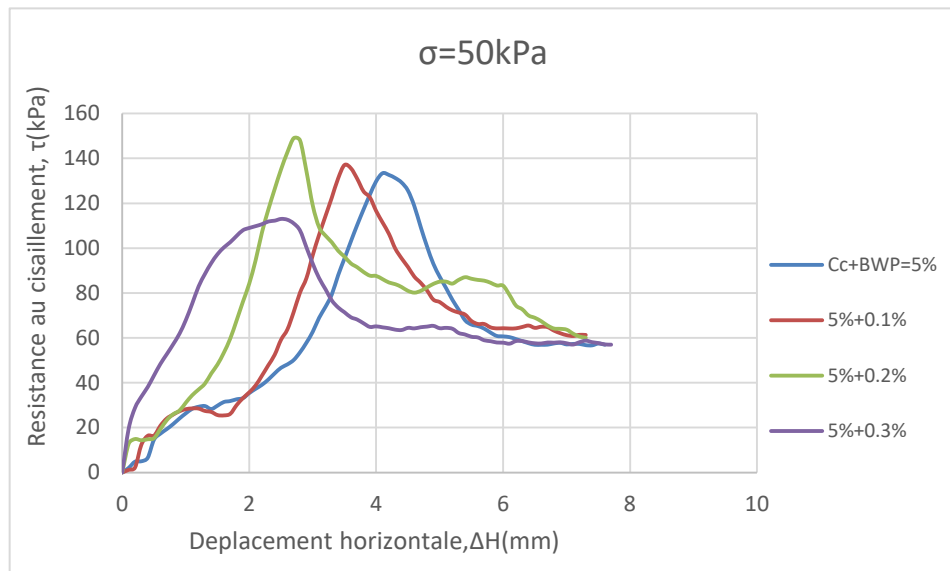
4.4. Effet de fibre de polypropylène

L'effet de la teneur en fibres sur le comportement mécanique du sable de chlef traité est étudié dans cette partie. Dans les courbes ci-dessous, il a été fixé les paramètres étudiés dans ce travail (densité, contrainte normale et teneur en eau) pour mettre en évidence l'effet de la teneur en fibres sur le comportement mécanique du sable utilisé. L'étude de l'effet sera faite en comparant les résultats obtenus lors des essais de cisaillement direct à différentes teneurs en fibres (0, 0,1, 0,2 et 0,3 %) dans des spécimens renforcés.

Dans cette étude, pour une densité relative ($Dr = 80\%$), l'influence de la teneur en fibres sur l'évolution de la résistance au cisaillement et les limites de résistance (courbes intrinsèques) se stabilisent. La figure 4.3 montre l'évolution de la relation résistance au cisaillement-déplacement horizontal d'un mélange sable-ciment – poudre de brique-fibres sous différentes contraintes normales. Une croissance proportionnelle de la résistance au cisaillement a été observée au cours de la période d'essai jusqu'à ce qu'elle soit constante après 7 mm de déplacement horizontal. On peut constater que la résistance tangentielle initiale (domaine élastique) de mélange sable-fibres est similaire pour tous les essais, ce qui indique une meilleure rigidité de la matrice sable traités-fibres, cependant la valeur finale de la résistance au cisaillement augmente proportionnellement à la teneur en fibres. Il est évident que l'ajout de fibres a contribué à accélérer le développement de la résistance au cisaillement. Pour des teneurs en fibres volumétriques de 0,1 et 0,2 %, la résistance maximale a été observée après 2,5 mm de déplacement horizontal ; cette évolution est significative pour la teneur en fibres

de 0,2 %. De plus, une augmentation de la résistance au cisaillement résiduelle a été observée pour les Échantillons renforcés par fibres.

- ❖ (Wc + Bwp) = 10 % + 0,1 % Fibres $\tau_{\max} = 537,39 \text{ kPa}$ $\sigma_n = 200 \text{ kPa}$
- ❖ (Wc + Bwp) = 10 % + 0,2 % Fibres $\tau_{\max} = 606,08 \text{ kPa}$ $\sigma_n = 200 \text{ kPa}$
- ❖ (Wc + Bwp) = 10 % + 0,3 % Fibres $\tau_{\max} = 520,83 \text{ kPa}$ $\sigma_n = 200 \text{ kPa}$



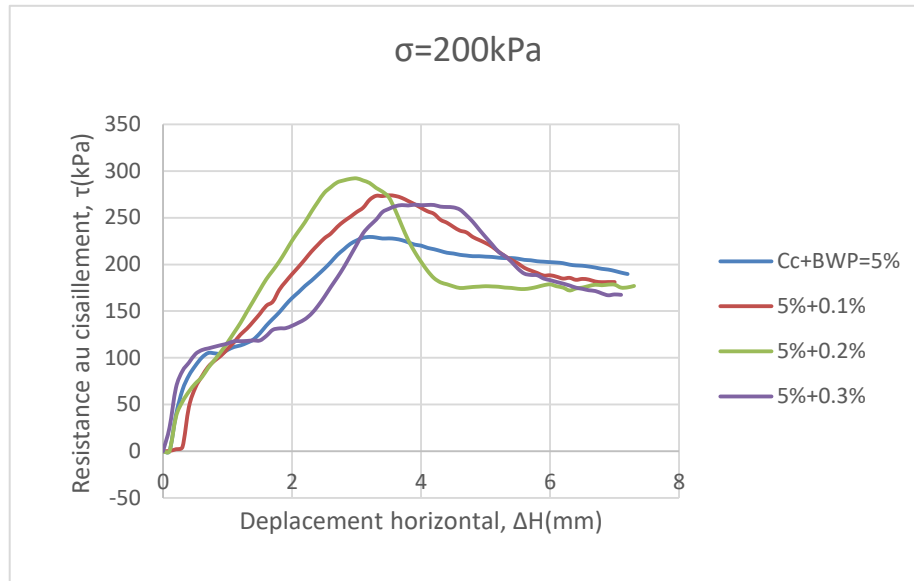
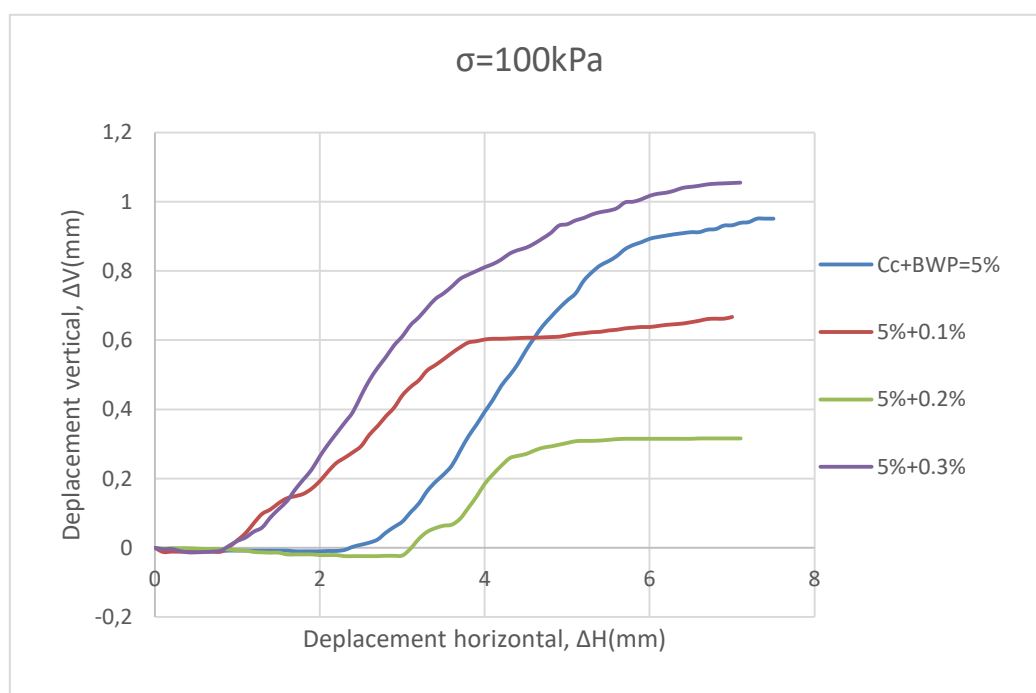
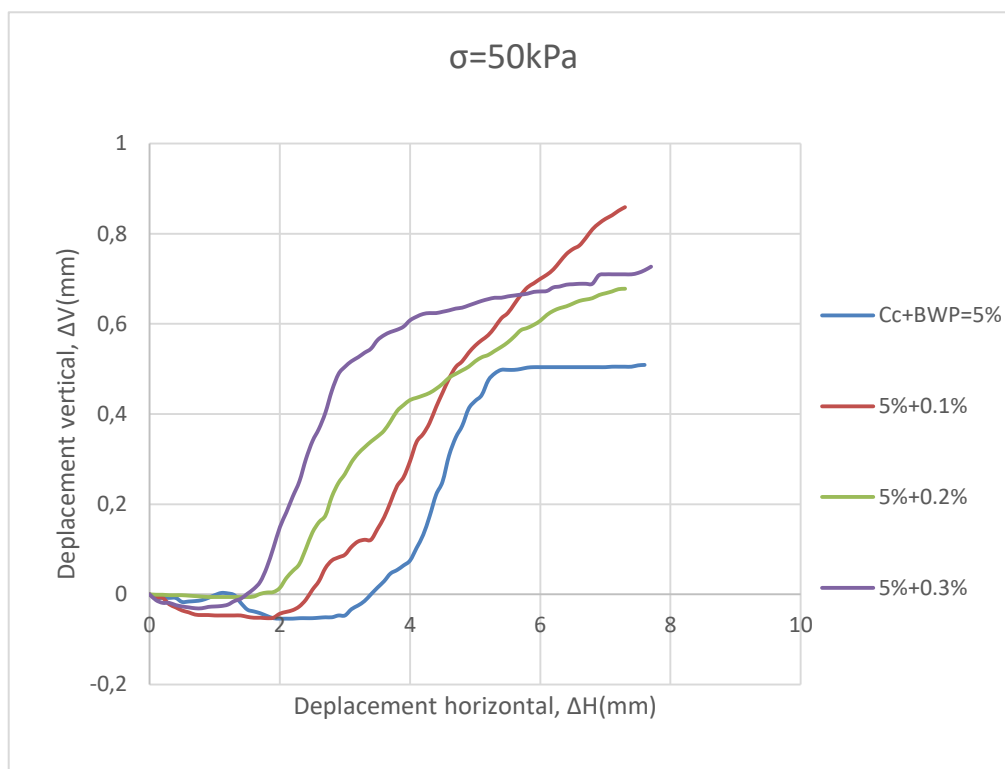


Figure 4.3: Effet de la teneur en fibres sur la résistance au cisaillement en fonction de la déformation horizontale avec un confinement de 50 kPa ; 100 kPa ; 200 kPa et une densité $D_r = 80\%$

4.5. Effet de teneur en fibre sur la contractante et la dilatance

La Figure 4.4 illustre la variation du déplacement vertical en fonction de déplacement horizontal pour des échantillons traités avec une teneur en (ciment+Bwp) de 2.5% ; 5% et 10% et de teneur en fibre de polypropylène de 0.1%, 0.2% et 0.3% soumise à des contraintes normales de 50 ; 100 et 200 kPa et à un état de densité ($D_r = 80\%$). La dilatance volumique des échantillons renforcés de fibres s'est avérée supérieure à celle des échantillons non renforcés, ce changement de volume est directement lié à la teneur en fibres. On note que la teneur en fibre de 0.2 % a donné une dilatance supérieure à la teneur en fibre de 0.3%. Après une réduction initiale du volume pour un déplacement horizontal inférieure à 4 mm pour les échantillons traités à 2.5% de (ciment + poudre de brique) et un déplacement d'environ 2 mm pour les sols traités par 5% de (ciment + poudre de brique), qui était moins importante que la réduction de la dilatance du sol cimenté. Les échantillons renforcés de fibres présentaient une dilatation volumétrique approchant la réponse caractéristique d'un sol dense. Les courbes de changement volumétrique indiquent clairement que la présence de fibres a considérablement limité la tendance à la contractance pour les différentes contraintes normales,



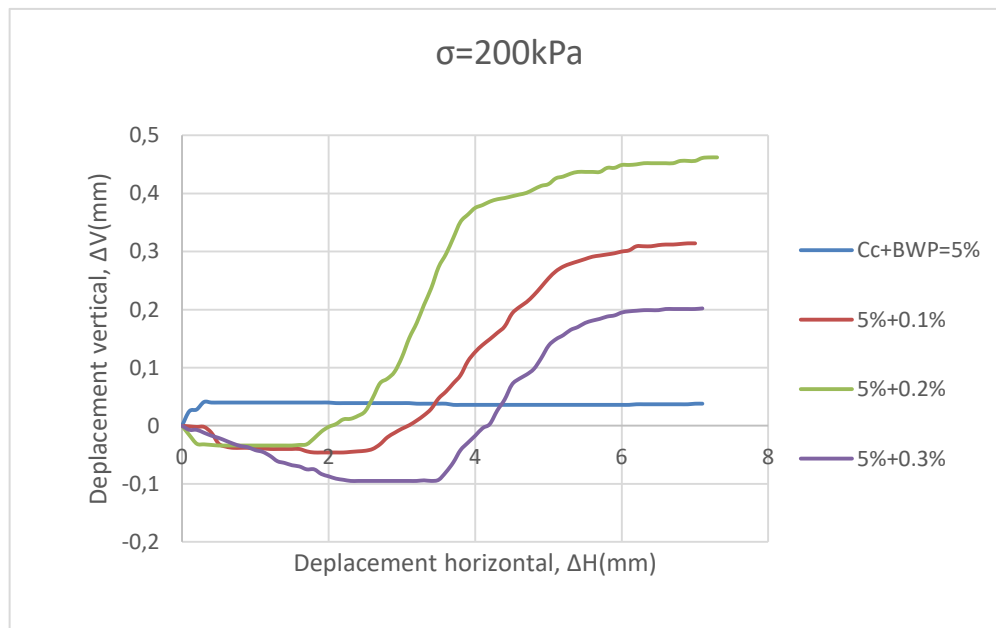
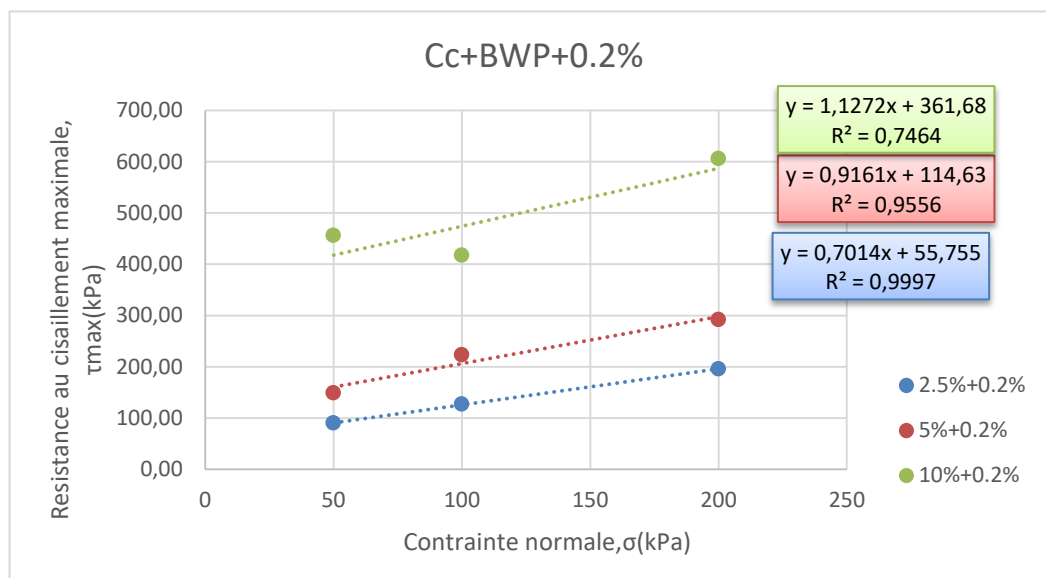
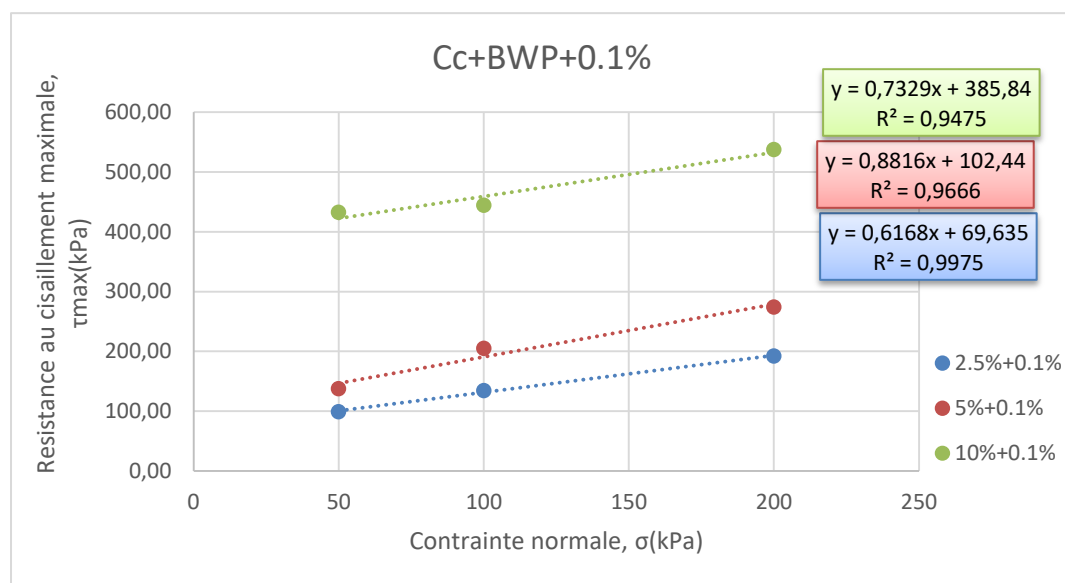
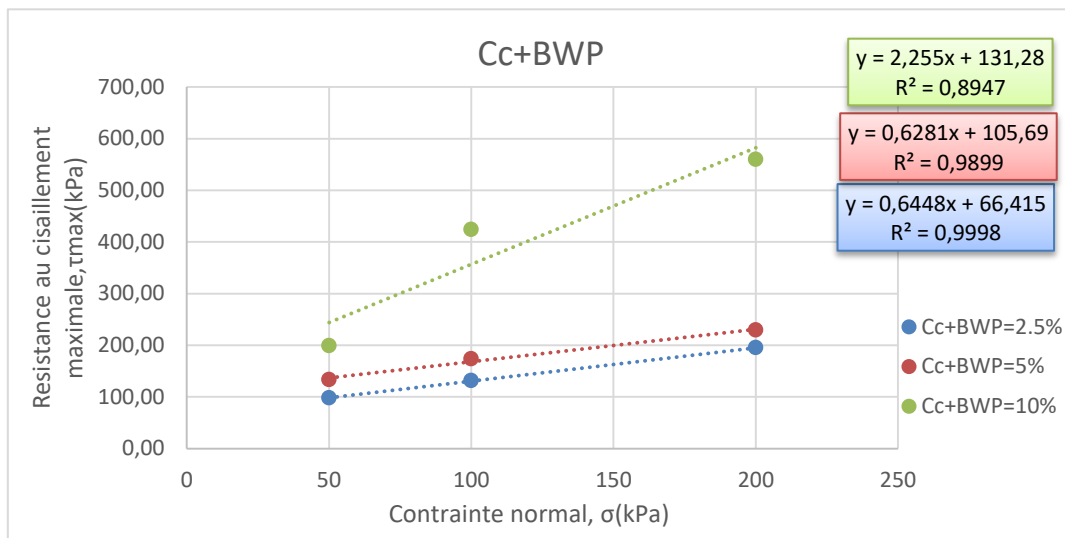


Figure 4.4: Effet de la teneur en fibres sur la déformation verticale en fonction de la déformation horizontale avec un confinement de 50 kPa ; 100 kPa ; 200 kPa et une densité $D_r = 80 \%$

Les courbes intrinsèques présentées dans la Figure 4.5 montrent que tous les échantillons renforcés présentent une résistance au cisaillement supérieure à celui des échantillons non renforcés. Pour une substitution $(C_c + Bwp) = 5\%$, les valeurs de la pente de l'angle de frottement pour des teneurs en fibres variées de 0,1 %, 0,2 % et 0,3 %, étaient de 0,88 ; 0,91 et 0,95. Dans la figure 4.5a, la pente de l'angle de frottement a varié de 0,61, 0,70 et 0,62, respectivement. Pour l'échantillon ayant une substitution $(C_c + Bwp) = 2,5\%$, la force inter granulaire des fibres avec les particules de sable produit la mobilisation de la résistance à la traction à des déformations plus élevées dans le plan de cisaillement. Plusieurs études ont démontré que l'augmentation de la teneur en fibres permet d'améliorer la résistance au cisaillement (Michalowski, 2002 ; Sadek et al., 2010). En mécanique du transfert des contraintes dans les composites renforcés par des fibres courtes, les contraintes appliquées sont d'abord transférées au matériau de la matrice (les grains du sable supportent la contrainte appliquée par la suite), puis aux fibres par l'intermédiaire des extrémités des fibres et des surfaces des fibres proches des extrémités des grains de sable.



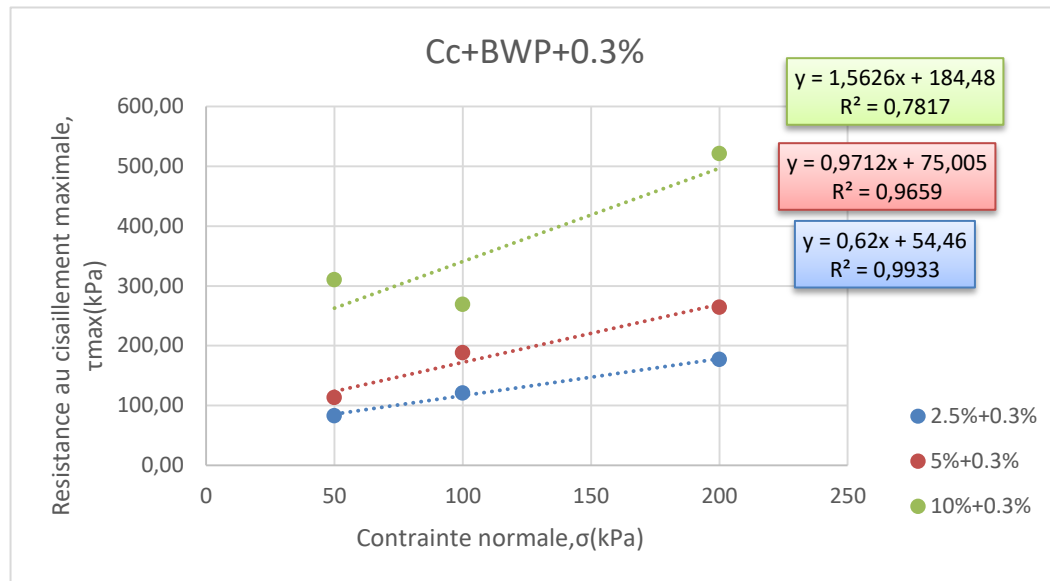
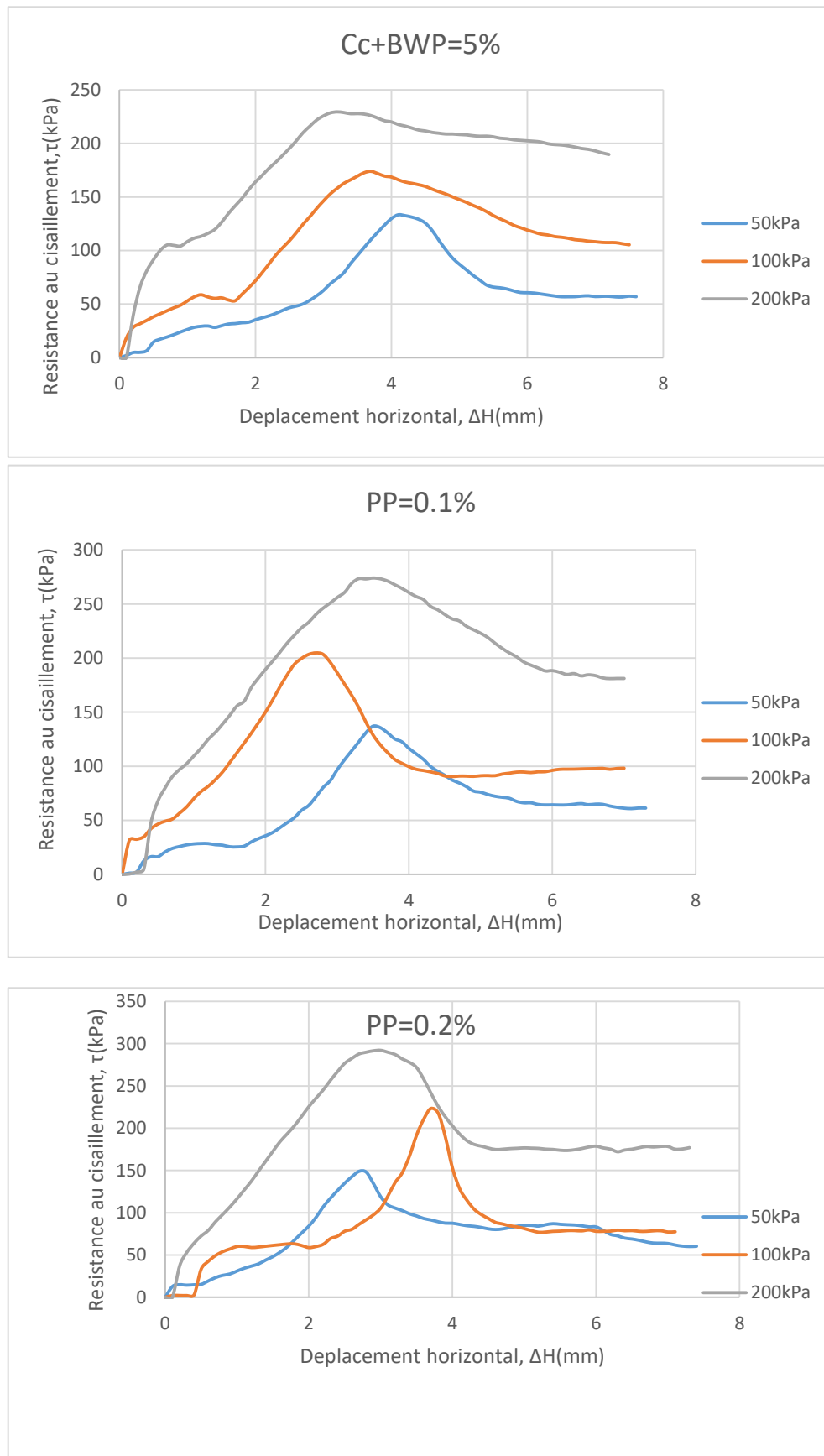


Figure 4.5: courbes intrinsèques Evolution de la résistance au cisaillement maximale en fonction de la contrainte normale : des échantillons renforcés et non renforcés

4.6. Effet de la contrainte normale

La variation de la résistance au cisaillement en fonction du déplacement horizontal d'un sable traité avec 5% de ciment+ brique en poudre et renforcé avec trois teneurs en fibre de polypropylène (0.1% ; 0.2% ; 0.3%) est illustré dans la figure 4.6. On observe que la résistance au cisaillement au pic augmente significativement avec l'augmentation de la contrainte normale. Par exemple, pour un échantillon de sable traité et renforcé avec un pourcentage de fibre de polypropylène de 0.1%, la résistance au cisaillement maximale est estimée 137.06 ; 204.78 ; 274.03kPa respectivement pour des contraintes normales de 50 ; 100 ; 200kPa



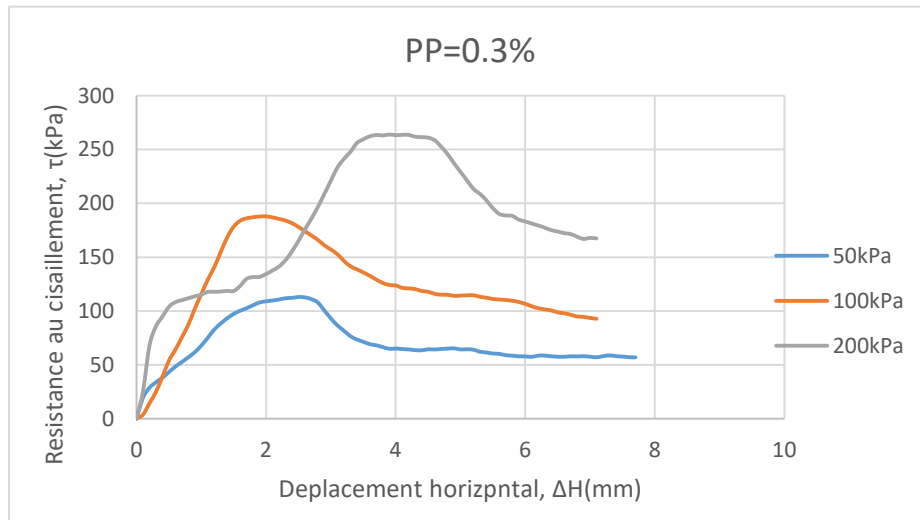


Figure4.6 : Effet de la contrainte normal sur la variation de la résistance au cisaillement en fonction du déplacement horizontal d'un sable traité et renforcé

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre il a été présenté une interprétation détaillée des différents résultats obtenus lors des essais effectués à l'aide de la boîte de cisaillement sur des échantillons de sable de

Chlef cimentés et traités partiellement par des déchets de brique en poudre et renforcés par des fibres de polypropylène. Les résultats obtenus ont mis en exergue les différents points suivants :

- L'augmentation de la substitution du ciment par de la poudre de brique influe d'une manière significative sur le comportement contrainte-déformation.
- L'ajout du composite (ciment + Bwp) et fibres dans le sable fait augmenter la résistance au cisaillement d'une manière considérable, la contractance du sol diminue et par conséquent la dilatance augmente et les échantillons du sol deviennent plus rigides.
- L'augmentation de la teneur en (ciment + Bwp) fait augmenter la cohésion (c) et l'angle de frottement (φ) d'une manière très significative.
- La résistance au cisaillement maximale augmente considérablement avec l'augmentation de la contrainte normale. Les caractéristiques mécaniques à savoir la cohésion et l'angle de frottement sont aussi améliorés avec l'augmentation de la contrainte normale.

Chapitre 5 : Résultats Paramétriques

5.1. Etude paramétrique

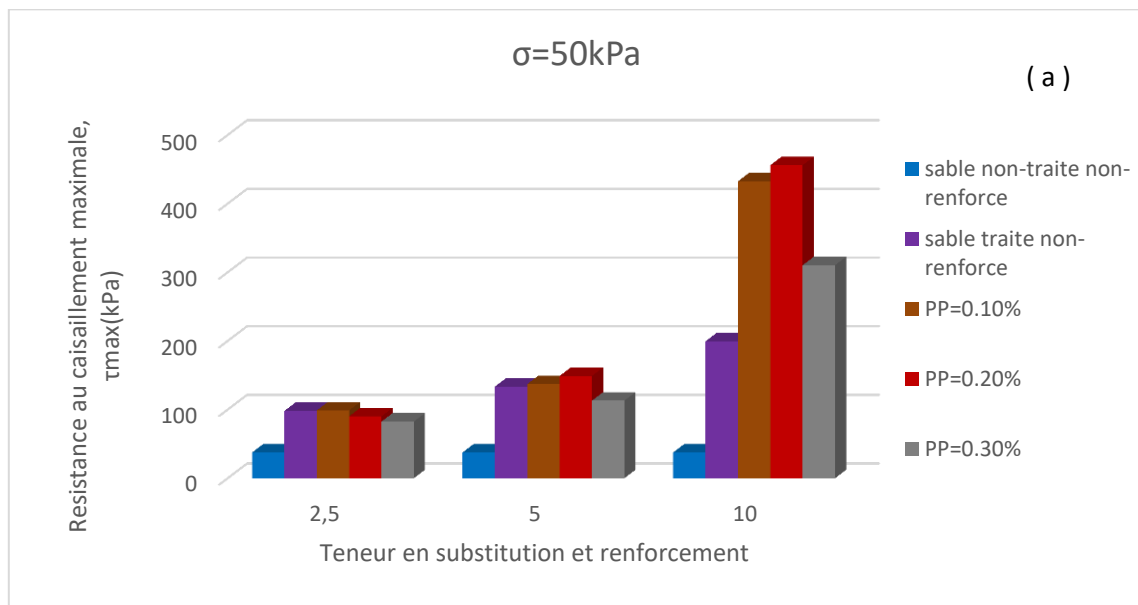
5.1.1. Etude de l'influence de substitution par BWP

5.1.1.1. Résistance au cisaillement maximale

La figure 5.1 montre l'évolution de la résistance maximale au cisaillement en fonction de la teneur en substitutions de ciment : 2,5 ; 5 ; 10 % et des teneurs en fibres de polypropènes. Plusieurs cas d'échantillons sont testés : traités et non renforcés, traités et renforcés sous des contraintes normales σ_n (kPa) = 50 ; 100 ; 200, préparés à une densité relative $D_r = 80$ %.

On peut remarquer qu'il y a une augmentation de la résistance au cisaillement maximale avec l'augmentation de la teneur en substitution en ciment ainsi que de fibres.

On note également que pour une teneur de (ciment + Bwp) de 10 %, la valeur de la résistance maximale a subi une augmentation significative comparativement aux résultats des travaux de Boutouba (2019) en utilisant 10% de ciment.



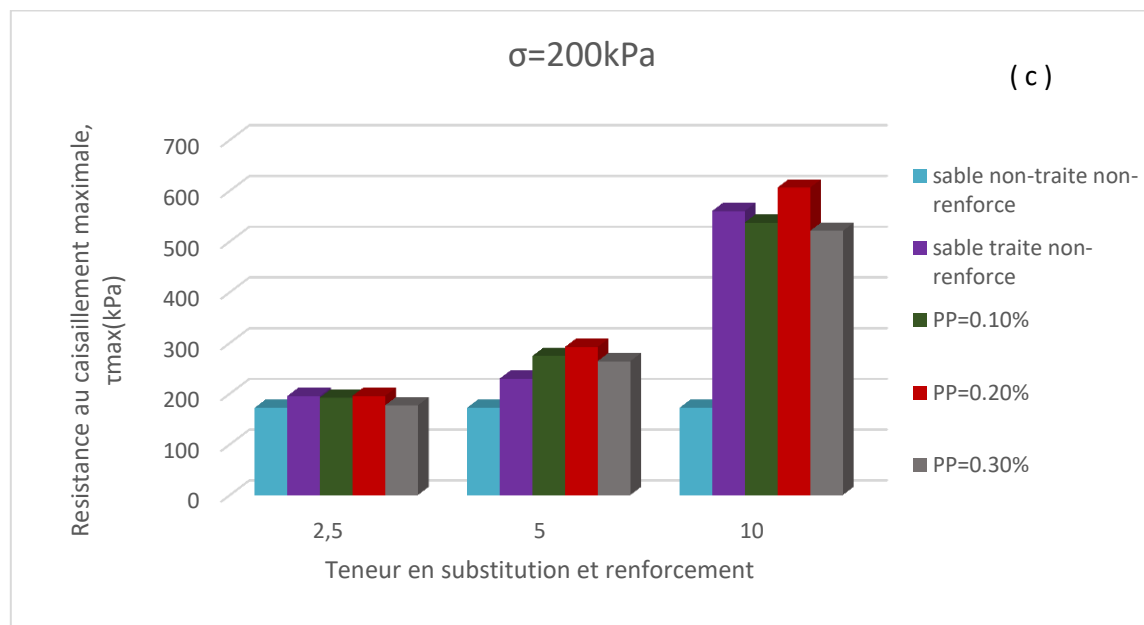
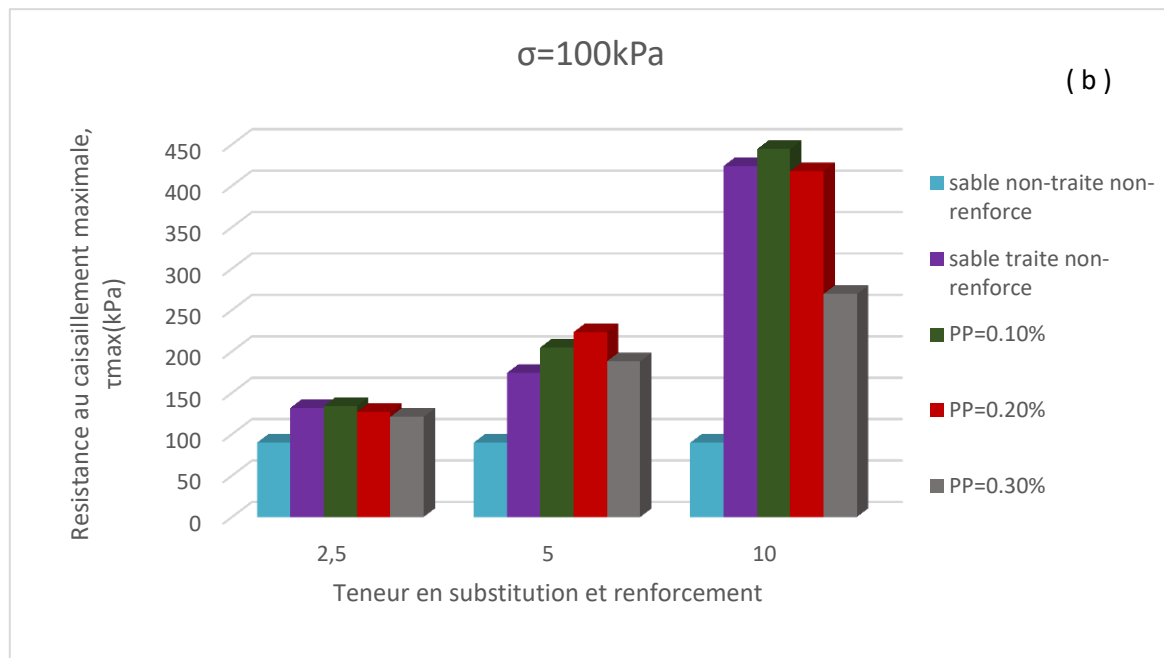


Figure 5.1 a ; 5.1 b et 5.1 c : Evolution de la résistance au cisaillement maximale en fonction des teneurs en substituants de Bwp et renforcement

Tableau 5.1 : Résistance au cisaillement maximale en fonction des teneurs en ciment et de substituants de Bwp et teneurs en fibres.

		Ratio 1 / 8			
Taux de fibres		0	0 ,1 %	0,2 %	0,3 %
2,5%	50 kPa	98,08	98,69	90,14	82,53
	100 kPa	131,75	134,00	126,92	120,86
	200 kPa	195,08	192,11	195,69	177,00
5%	50 kPa	133,42	137,06	149,03	113,03
	100 kPa	174,00	204,78	223,33	187,92
	200 kPa	229,47	274,03	292,14	263,97
10%	50 kPa	199,36	432,44	455,97	310,28
	100 kPa	423,78	444,19	417,50	269,22
	200 kPa	559,94	537,39	606,08	520,83

Le tableau 5.2 suivant représente la variation de la résistance au cisaillement maximale en fonction de l'effort normal des différentes teneurs de substitution de ciment par déchets de brique en poudre. Les résultats conformes à ceux de Tadjine et bouziane (2024), montrent que l'augmentation de substitution de ciment par la poudre de brique réduit la résistance au cisaillement maximale. Par exemple, la résistance au cisaillement maximale pour une contrainte normale de 50kPa est estimée à 189.33 ; 168.67 et 146.56 kPa pour ratio 0, ratio 1/4 et ratio 1/2 respectivement. D'autre part, les résultats indiquent qu'une substitution de 1/8 de ciment par de brique en poudre donne une résistance au cisaillement maximale qui dépasse les trois ratios de substitution mentionnés précédemment. Par exemple, la résistance au cisaillement maximale sous une contrainte normale de 200 kPa est évaluée à 599.94 ; 499 ; 397.39 et 391.06 kPa respectivement pour les ratios 1/8 ; 0 ; 1/4 et 1/2

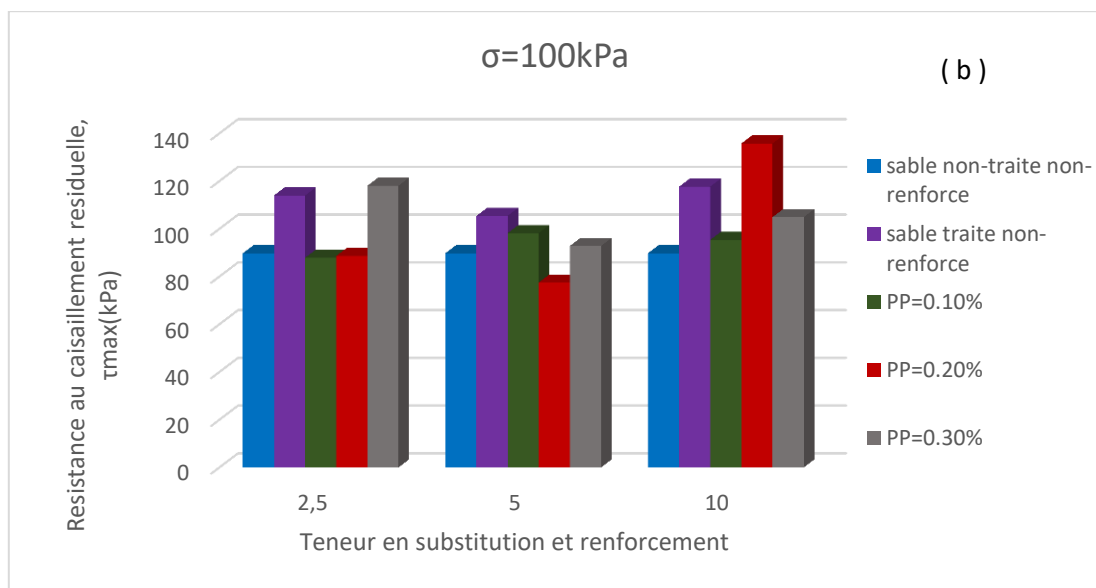
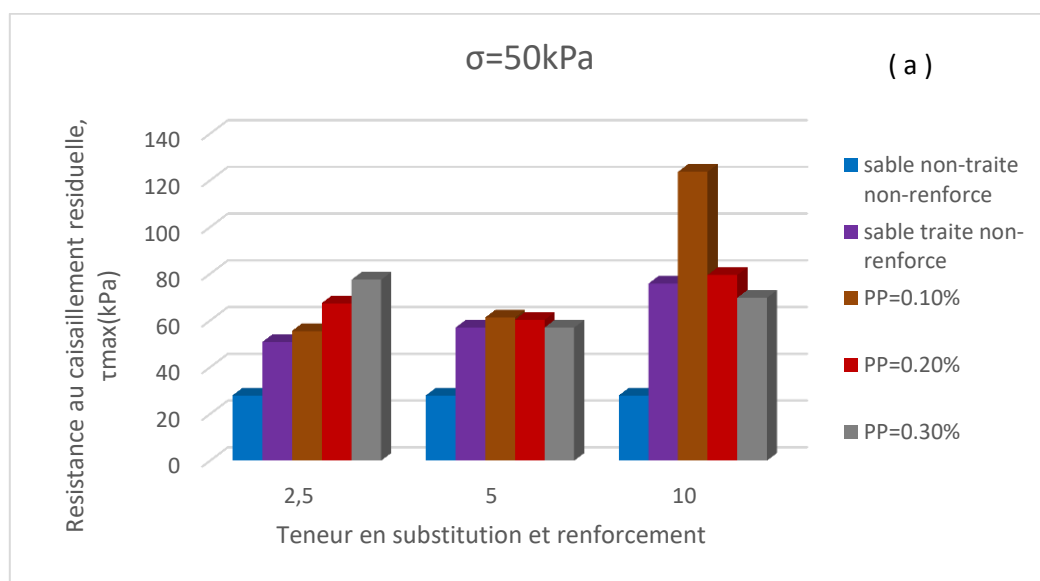
Tableau 5.2 : Résistance au cisaillement maximale en fonction des teneurs en ciment et substitution de BWP

	Ratio 1/8	Ratio 0	Ratio 1/4	Ratio 1/2
σ (kPa)	Cc+BWP=10%			
50kPa	199.36	189.33	168.67	146.56
100kPa	423.78	354	311	280.19
200kPa	559.94	499	397.39	391.06

5.1.1.2. Résistance au cisaillement résiduelle

Les figures (5.2 a, 5.2 b) représentent l'évolution de la résistance au cisaillement résiduelle τ_{res} (kPa) en fonction des teneurs de substituants de Bwp et teneurs en fibres réalisés pour des

échantillons traités par différents teneurs en substituant de Bwp, d'autres renforcés par des teneurs de fibres de polypropylène (0,1 ; 0,2 ; 0,3 %) sous des contraintes normales $\sigma_n = 50$; 100 et 200 (kPa) à un état dense. On note à travers la figure 5.2 que la résistance résiduelle du sable cimenté partiellement tout comme la résistance maximale augmente d'une manière significative pour chaque teneur en substitution de Bwp et ceux pour chaque teneur des fibres étudiée où on constate une augmentation des valeurs de la contrainte de cisaillement résiduelle avec l'augmentation de la teneur en substitution de ciment et de la contrainte normale. Les valeurs de contraintes de cisaillement résiduelles en fonction des teneurs de substituants de Bwp et teneur en fibres sont résumées dans le tableau 5.3.



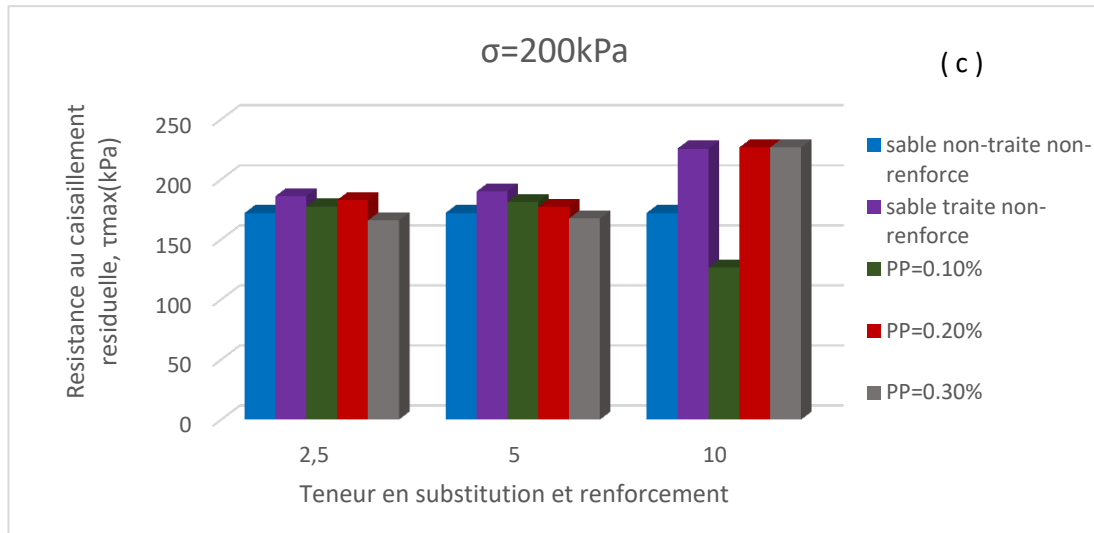


Figure 5.2 a ; 5.2 b et 5.2 c: Evolution de la résistance résiduelle en fonction des teneurs en substituants de Bwp et renforcement

Tableau 5.3 : Résistance au cisaillement résiduelle en fonction des teneurs en ciment et de substituants de Bwp.

		Ratio 1 / 8			
		0	0 ,1 %	0,2 %	0,3 %
2,5%	50 kPa	50,78	55,53	67,42	77,44
	100 kPa	113,97	87,86	88,64	118,06
	200 kPa	185,92	177,36	182,78	165,86
5%	50 kPa	56,94	61,31	60,33	56,97
	100 kPa	105,42	98,17	77,47	92,83
	200 kPa	189,72	181,14	176,47	167,44
10%	50 kPa	75,78	123,67	79,50	69,57
	100 kPa	117,67	95,36	135,81	104,92
	200 kPa	225,47	126,36	226,47	226,47

5.1.2. Indice de ductilité

Les échantillons de sable cimentés ont indiqué un comportement fragile attribué à l'apparition de surfaces de rupture due aux contraintes de cisaillement appliquées. Consoli et al. (1998) ont utilisé l'indice de ductilité comme indicateur du comportement fragile du sol. L'équation de l'indice de ductilité est la suivante :

$$IB = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\text{res}}} - 1$$

Où :

- IB : Indice de ductilité.
- $\tau_{\max}$: Résistance maximales au cisaillement.

- τ_{res} : Résistance résiduelles au cisaillement.

Les valeurs de l'indice de ductilité indiquent que l'ajout de ciment dans le sol entraîne une augmentation de la rigidité, de la fragilité et de la résistance maximale. Ce comportement fragile est accentué par une augmentation de la teneur en ciment. Cabalar et al. (2017) ont postulé que puisque la solution elle-même se comporte de manière plastique, l'augmentation de la concentration en liant augmente la ductilité du sable traité. Cependant, on constate aussi qu'une augmentation de la teneur de substituant de Bwp entraine une diminution des valeurs de l'indice de ductilité.

De plus, nous avons prouvé dans notre étude que l'augmentation des teneurs en fibres conduit clairement à une diminution du module de ductilité, notamment à une teneur en fibre PP= 0,3%,

Donc, les fibres augmentent la résistance au cisaillement résiduelle et diminuent ainsi le module de ductilité, ce qui entraine une diminution de la chute de rupture. C'est l'un des objectifs recherchés de l'étude.

Les valeurs de l'indice de ductilité des échantillons cimentés sont résumées dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Indice de ductilité des échantillons cimentés en fonction des teneurs en ciment et de substituant de Bwp.

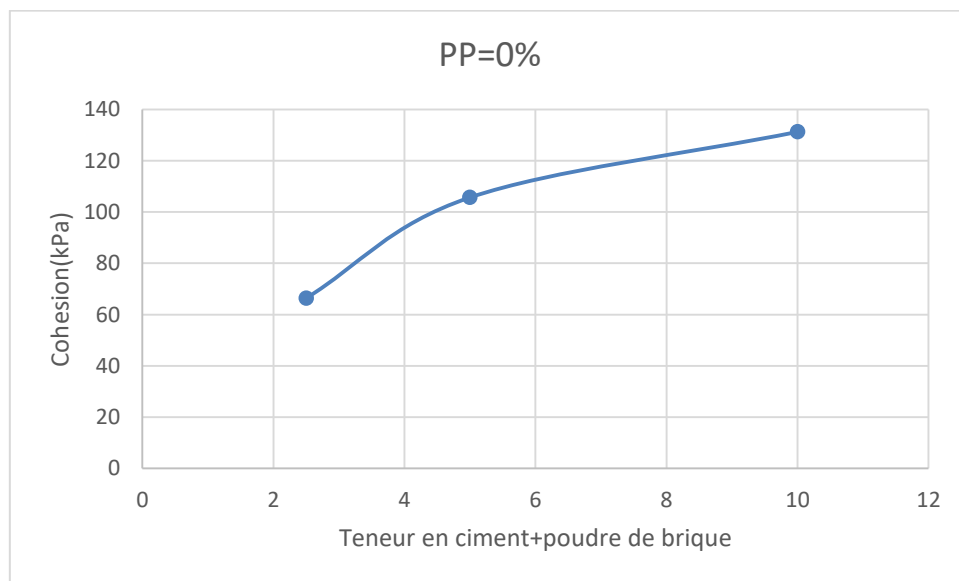
		Ratio 1 / 8			
		0	0,1 %	0,2 %	0,3 %
2,5%	50 kPa	0,93	0,77	0,33	0,06
	100 kPa	0,15	0,52	0,43	0,02
	200 kPa	0,04	0,08	0,07	0,06
5%	50 kPa	1,34	1,23	1,47	0,98
	100 kPa	0,65	1,08	1,88	1,02
	200 kPa	0,20	0,51	0,65	0,57
10%	50 kPa	1,63	2,49	4,73	3,44
	100 kPa	2,60	3,65	2,07	1,56
	200 kPa	1,48	3,25	1,67	1,29

5.1.3. La Cohésion et l'Angle de frottement

5.1.3.1. La Cohésion

La figure 5.3 montre l'évolution de la cohésion en fonction des teneurs en substitution du Bwp, et les teneurs en fibres de polypropylènes à l'état dense. Les résultats indiquent qu'il existe une augmentation significative de la cohésion avec l'augmentation de la teneur en (ciment+ Bwp). Pour les trois teneurs de $(Cc + Bwp) = 2,5 ; 5 ; 10 \%$ Les résultats de la cohésion enregistrés sont 66,41 ; 105,69 et 131,28 kPa respectivement, en opposition aux résultats de TDJINE (2024) et BOUTOUBA (2019). Tandis que les échantillons traités et renforcés ont montré une amélioration significative de la cohésion à la même teneur de $(Cc + Bwp) = 10 \%$ avec une teneur en fibre 0,3 %, et une amélioration encore plus remarquable pour les teneurs en fibres de 0,1 et 0,2 %. Les résultats de la cohésion enregistrés pour le sable traité et renforcés sont :

- $(Cc + Bwp) = 10 \%$ et $(PP = 0,1 \%)$: la cohésion est 385.84 kPa.
- $(Cc + Bwp) = 10 \%$ et $(PP = 0,2 \%)$: la cohésion est 361.68 kPa
- $(Cc + Bwp) = 10 \%$ et $(PP = 0,3 \%)$: la cohésion est 184.48 kPa



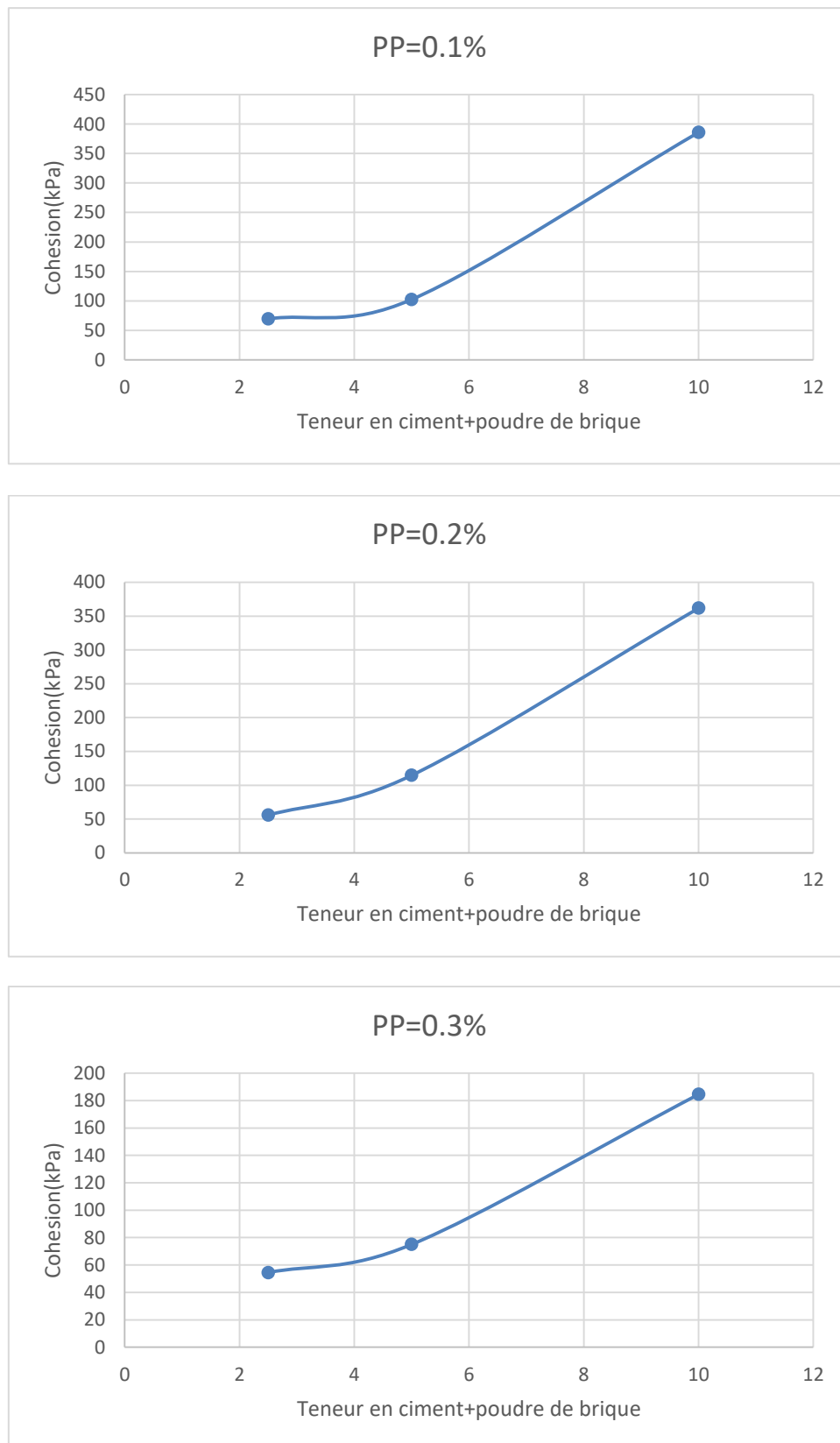
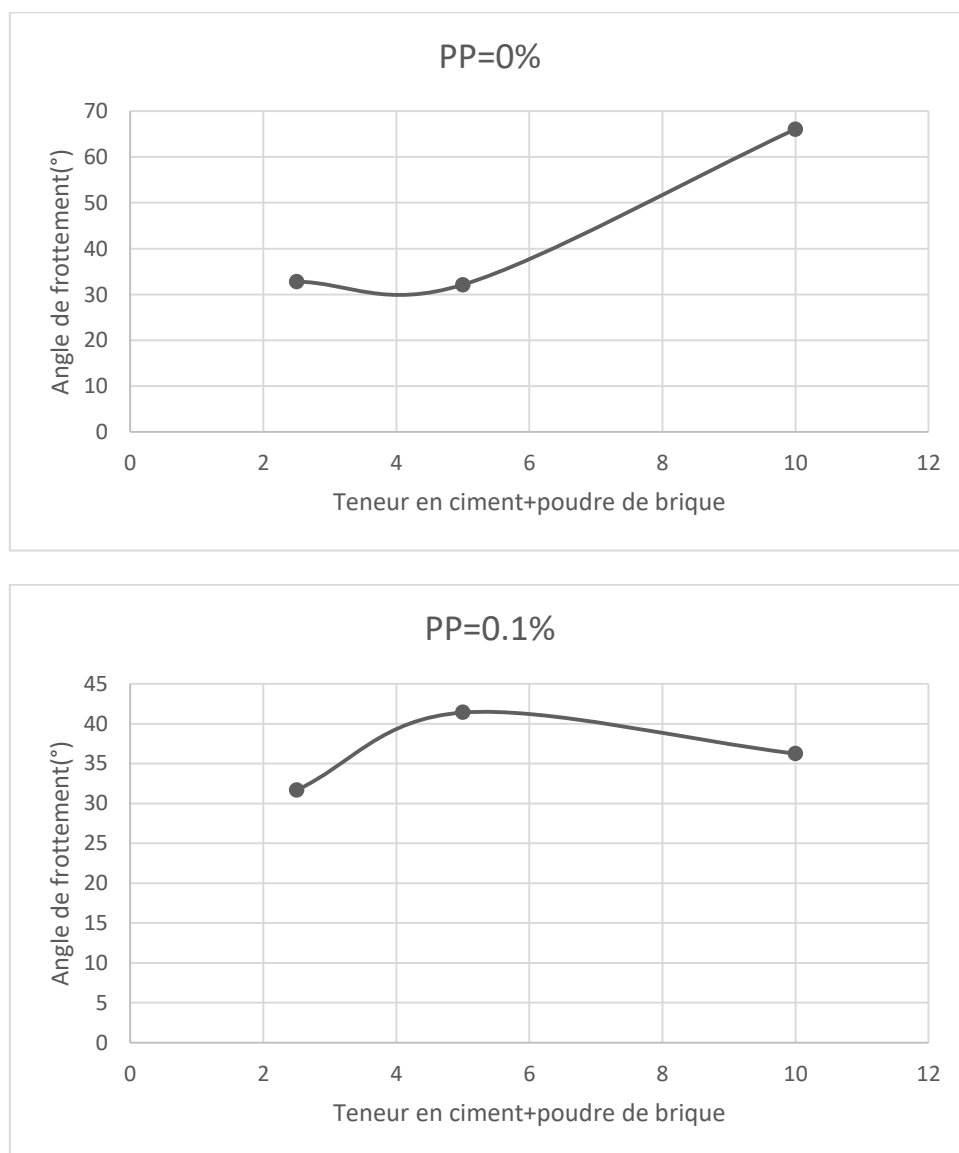


Figure 5.3 : Evolution de la cohésion en fonction des teneurs en substituants de Bwp.et teneurs en fibres de polypropylènes.

5.1.3.2. Angle de frottement interne

La figure 5.4 montre l'évolution de l'angle de frottement interne en fonction de la substitution de Bwp et en teneur de fibres, à l'état dense. Les résultats indiquent que l'angle de frottement interne s'est amélioré grâce aux teneurs en brique où il a été enregistré une stabilité aux environs de $32,81^\circ$; $32,13^\circ$ pour des teneurs de Bwp de 2,5% et 5% , mais pour la substitution de 10% on peut remarquer une amélioration significative qui peut atteindre le double de la valeur initiale, tandis que la présence de fibres a inversé la règle et a réduit l'angle de frottement à la teneur de 10 %, et améliore l'angle à la teneur de substitution de 5%



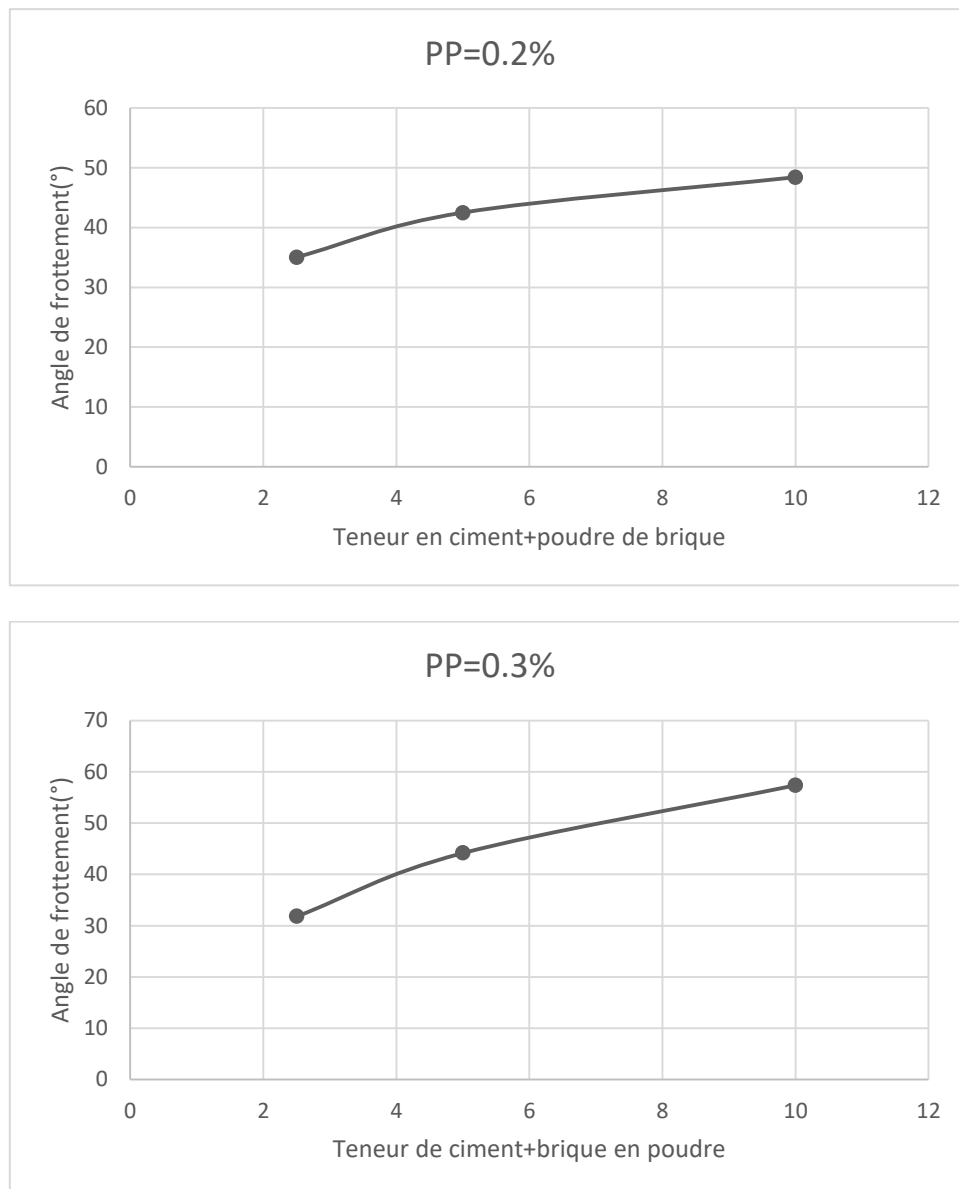


Figure 5.4: Evolution de l'angle de frottement en fonction des teneurs en substituants de Bwp.et teneurs en fibres de polypropylènes.

Tableau 5.5 récapitulation des résultats aux égards de la littérature.

	7J				
	Sans fibres		Avec fibres		
Cc + Bwp	C (KPa)	Ø (°)	PP	C (Kpa)	Ø (°)
2,5 %	66,41	32,81	0,1	69,63	31,38
			0,2	55,75	34,99
			0,3	54,46	31,79
5 %	105,69	32,13	0,1	102,44	41,34
			0,2	114,63	42,30
			0,3	75,00	44,12
10 %	131,28	66,08	0,1	385,84	36,13
			0,2	361,68	48,24
			0,3	184,48	57,34

5.1.4. Rapport d'amélioration

Afin d'évaluer l'effet du traitement par ciment et substituant partiel de Bwp sur la résistance au cisaillement du sable, il a été utilisé le rapport de résistance au cisaillement (S_r), défini par Zhang et al., (2006) selon la relation suivante :

$$S_r = \tau_{\max} / \tau_{\max}^{nT}$$

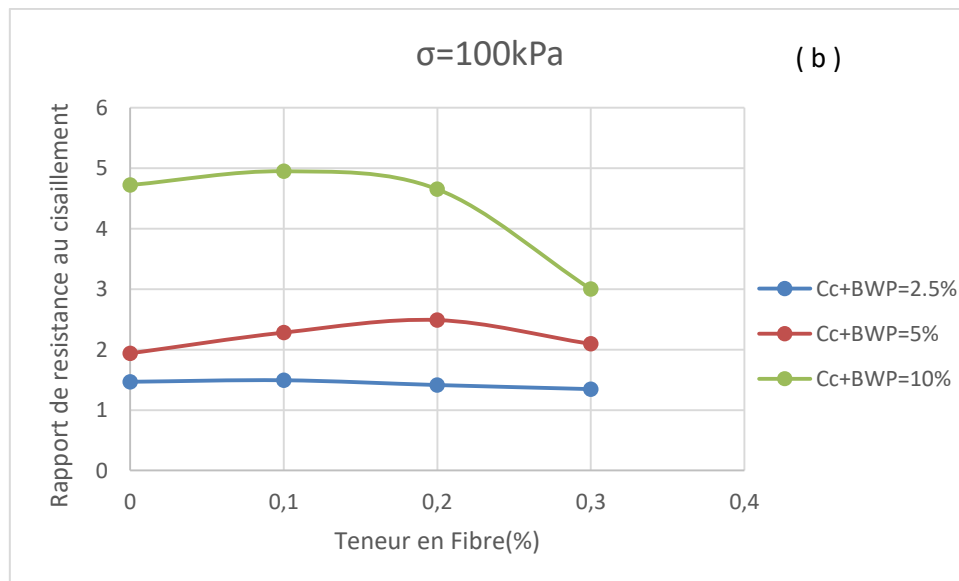
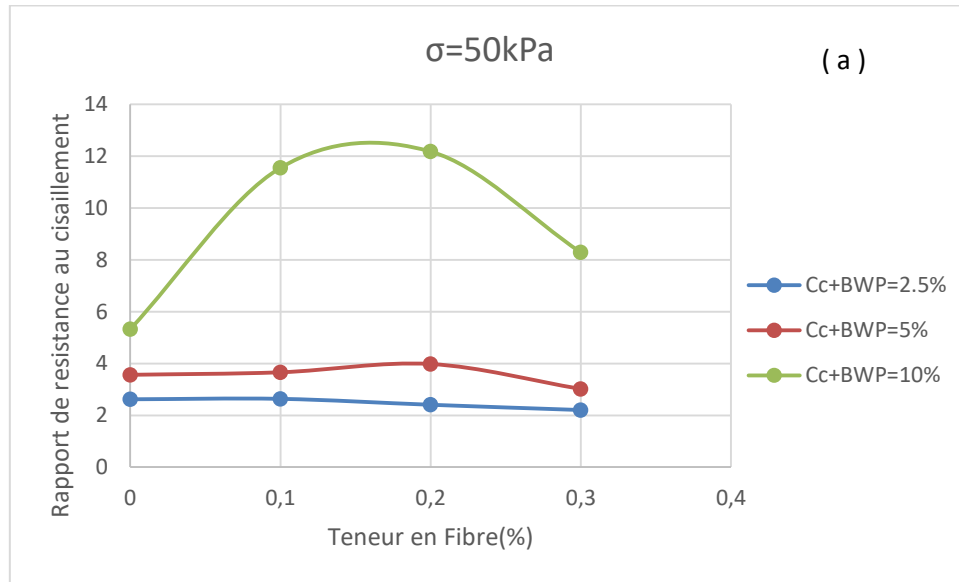
Où :

- $\tau_{\max}^T$: la résistance au cisaillement maximale du sable traité.
- $\tau_{\max}^{nT}$: la résistance au cisaillement maximale du sable non traité.

Les valeurs du rapport de résistance au cisaillement (S_r) pour différentes teneurs de substitutions Bwp sont calculées et résumées dans le tableau 5.6. La figure 5.5 montre la variation du rapport de résistance au cisaillement pour le sable traité et traité – renforcé à celui du sable non traité à un état dense sous différentes contraintes normales ($\sigma_n = 50, 100, 200$ kPa). On constate que le rapport de résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur de ciment. Cependant, on note une augmentation du rapport d'amélioration avec l'augmentation du taux de substitution. Ceci, prouve l'influence positive de la substitution par Bwp sur les valeurs du rapport de résistance au cisaillement.

En revanche, l'augmentation de la teneur en fibres n'a pas donné le résultat attendu sauf dans les cas des teneurs de fibres 0,1% et 0,2% , avec la teneur en substitution fixée à 10%.

Aussi, on constate une diminution des valeurs de S_r avec une augmentation de la contrainte normale. Ceci indique que le traitement de sol par substitution est plus adapté pour les couches de sol superficielles.



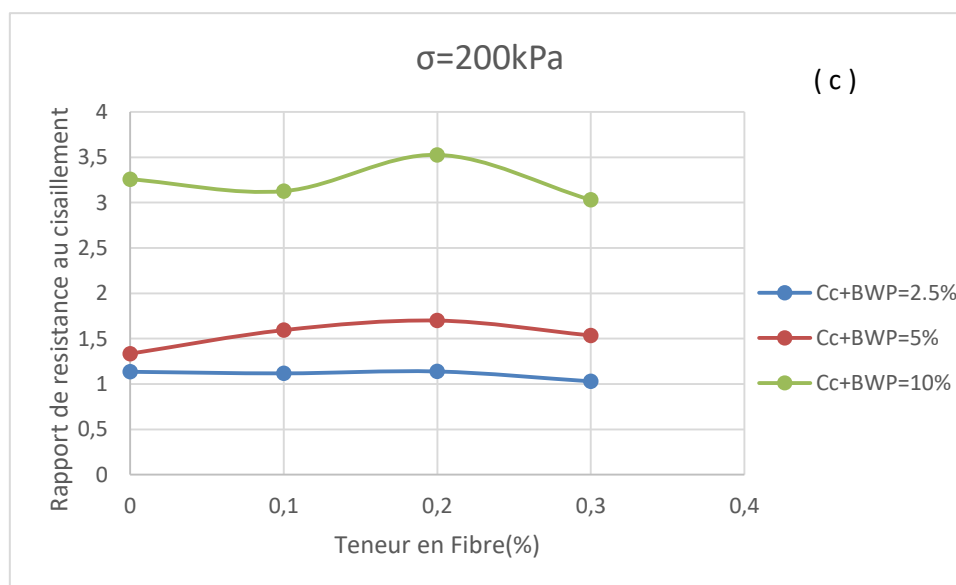


Figure 5.5a ; 5.5b et 5.5c : Evolution du rapport d'amélioration en fonction des teneurs en ciment et de substituts de Bwp et fibres

Tableau 5.6 : Rapport d'amélioration en fonction des teneurs en substituts de Bwp et fibres de polypropylènes.

		Ratio 1 / 8			
		0	0,1 %	0,2 %	0,3 %
2,5%	50 kPa	2,62	2,63	2,40	2,20
	100 kPa	1,46	1,49	1,41	1,34
	200 kPa	1,13	1,11	1,13	1,02
5%	50 kPa	3,56	3,66	3,98	3,01
	100 kPa	1,93	2,28	2,48	2,09
	200 kPa	1,33	1,59	1,69	1,53
10%	50 kPa	5,32	11,54	12,17	8,28
	100 kPa	4,72	4,94	4,65	2,99
	200 kPa	3,25	3,19	3,52	3,03

5.2 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude paramétrique a été menée pour tester l'efficacité de la substitution du ciment par de la poudre de brique, et l'association des fibres polypropylènes.

Les résultats des essais montrent qu'il y a une augmentation de la résistance au cisaillement maximale avec l'augmentation de la teneur en substitution en (ciment+Bwc) ainsi que de fibres.

Les fibres ont causé une augmentation de la résistance au cisaillement résiduelle et une diminution du module de ductilité, ce qui entraîne une diminution de la chute de rupture.

Une amélioration significative de la cohésion à la teneur de $(C_c + B_{wp}) = 10\%$ avec une teneur en fibre $0,3\%$ est constatée. En plus, une amélioration remarquable avec des teneurs en fibres de $0,1$ et $0,2\%$.

Il a été noté une bonne amélioration de l'angle de frottement interne pour la substitution de 10% qui peut atteindre le double de l'état initial, tandis que la présence de fibres a inversé la règle et a réduit l'angle de frottement interne.

Par ailleurs, il a été enregistré une amélioration de l'angle de frottement pour la teneur de substitution de brique de 5% avec des teneurs de fibres de $0,1\%$ et $0,2\%$.

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion Générales

Conclusions Générales

Cette recherche porte sur l'amélioration des propriétés du sable. De la région de chlef, classe en zone sismique 3. Et qui souffre du phénomène de liquéfaction et d'instabilité. Notamment sous l'effet des charges sismique. Pour remédier à cette problématique une série d'essais en l'laboratoire a été réalisée, en s'appuyant sur les recherches antérieures, dans le but de développer un sol plus résistant et fiable.

La méthode adoptée a traité le sol par un mélange de ciment et de poudre de brique une solution à la fois économique, permettant de valoriser les déchets et d'utiliser des matériaux locaux à faible coût. Le sol a également été renforcé par des fibres synthétiques afin de réduire le retrait et d'améliorer la cohésion interne du mélange.

Les résultats obtenus ont montré une amélioration significative des propriétés mécaniques des sables

- ✓ Nous constatons qu'il y a une augmentation de la résistance au cisaillement maximale avec l'augmentation de la teneur en substitution en ciment ainsi que de fibres.
- ✓ Nous notons également que pour une teneur de (ciment + Bwp) de 10 %, la valeur de résistance maximale a montré une augmentation significative
- ✓ l'augmentation de la phase de dilatance et par conséquent la phase de contractance diminue ceci montre le rôle favorable de la substitution quant à l'augmentation de la cohésion entre les grains du sol.
- ✓ Il est évident que l'ajout de fibres a contribué à accélérer le développement de la résistance au cisaillement. Pour des teneurs en fibres volumétriques de 0,1 et 0,2 %, la résistance maximale a été observée après 2,5 mm de déplacement horizontal ; cette évolution est significative pour la teneur en fibres de 0,2 %. De plus, une augmentation de la résistance au cisaillement résiduelle a été observée pour les Échantillons renforcés par des fibres.
- ✓ La dilatance volumique des échantillons renforcés de fibres s'est avérée supérieure à celle des échantillons non renforcés,
- ✓ on constate aussi qu'une augmentation de la teneur de substituant de Bwp entraîne une diminution des valeurs de l'indice de ductilité.

une amélioration significative de la cohésion à la même teneur de $(C_c + B_{wp}) = 10\%$ avec une teneur en fibre 0,3 %. et une amélioration remarquable de la teneur en fibres de 0,1 et 0,2 %.

Ces résultats confirment l'efficacité du traitement pour améliorer la stabilité du sol sous contraintes dynamique.

Les meilleures performances ont été observées avec un dosage optimal de 10 % de mélange ciment-poudre de brique associé à un taux de fibres de 0,1 à 0,2 proportions qui ont considérablement amélioré le comportement mécanique du sol.

Perspectives

Dans une perspective de recherche, plusieurs domaines méritent au moins d'être approfondis tels que :

- Dans un but de confirmation des tendances trouvées, compléter les essais réalisés, en utilisant d'autres déchets (nano clay, nano silicaten.)
- Etudier l'ajout de fibres de polypropènes a des échantillons de différentes longueurs pour obtenir des meilleures performances mécaniques.

Références et Bibliographiques

Références Bibliographiques

REFERENCES

Belkhatir .M, A. Arab, T. Schanz, H. Missoum, N. Della [2011] "Laboratory study on the liquefaction resistance of sand-silt mixtures: effect of grading characteristics", Granular Matter (2011) 13:599–609

Arab A. et al ., (2010). Etude en laboratoire de l'amélioration des sols par l'augmentation de la densité relative, université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), 26 – 27 octobre 2010.

Della,N ;Belkhatir. M;Arab.A ; Canou J. & Dupla J.C ,(2014), Effect of fabric method on instability behavior of granular material. Acta Mechanica 225, pp. 2043–2057.

Benziane, M. M. (2021). EVALUATION DES PERFORMANCES A LA LIQUEFACTION D'UN SOL NON COHERENT AMELIORE PAR FIBRES NATURELLES ET SYNTHETIQUES. Université Hassiba Benbouali de Chlef

Benziane, M. M., Della, N., Denine, S., Sert, S., & Nouri, S. (2019). Effect of randomly distributed polypropylene fiber reinforcement on the shear behavior of sandy soil. Studia Geotechnica et Mechanica, July. <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0014>

Belkhatir, M., Arab, A., Della, N., Missoum, H., & Schanz, T. (2010). 【bad/results can be used to make comparison】 Liquefaction resistance of Chlef river silty sand: Effect of low plastic fines and other Parameters. Acta Polytechnica Hungarica, 7(2), 119–137.

Bahda, F. (2010). Etude du comportement du sable à l ' appareil triaxial : expérience et modélisation. In Thèse. L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES.

Aouali, N., Benessalah, I., Arab, A., Ali, B., & Abed, M. (2019). Shear Strength Response of Fibre Reinforced Chlef (Algeria) Silty Sand: Laboratory Study. Geotechnical and

REINFORCED WITH SYNTHETIC FIBERS Juan Jose Claria 1 and Paula Vanesa Vettorelo 2. 53(1), 11–15. <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9357-9>

. Della, N., Missoum, H., Arab, A., & Belkhatir, M. (2010). Experimental study of the overconsolidation and saturation effects on the mechanical characteristics and residual strength of chlef river sandy soil. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 54(2), 107– 116. <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2010-2.06>

Références Bibliographiques

Characteristics of Natural and Synthetic Fiber-Reinforced Sandy Soil in Pavement Construction. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 1–18.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2181266>

Khan, F., Hossain, N., Hasan, F., Rahman, S. M. M., Khan, S., Saifullah, A. Z. A., & Chowdhury, M. A. (2024). Advances of natural fiber composites in diverse engineering applications—A review. *Applications in Engineering Science*, 18(May), 100184. <https://doi.org/10.1016/j.apples.2024.100184>

Manuel, J., Sotomayor, G., Sc, D., Alelvan, G. M., Dal, M., Casagrande, T., & Sc, D. (2021). Influence of Polypropylene Fiber-Reinforcement on the Mechanical Behavior of Gold Ore Tailings through Direct Shear Tests. 33(10).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003878](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003878)

Reyes-Gonzalez, D. (2022). Natural Fibers: An Alternative for the Reinforcement of Expansive Soils. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159275>