

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique**

**UNIVERSITE DE BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie civil**

**Laboratoire de recherche NEIGE**

**THESE DE DOCTORAT TROISIÈME CYCLE**

**Spécialité : Géotechnique**

**THEME**

Etude du Comportement des Sables Renforcés par des fibres et/ou Polymères, Etude expérimentale et numérique. (Application aux sables Algériens).

Par

**Benathmane BAGHDIR**

Devant le jury composé de :

<b>Djillali AMAR BOUZID</b>	<b>Professeur</b>	<b>U. Saad Dahleb, Blida 1</b>	<b>Président de Jury</b>
<b>Yacine SAIL</b>	<b>MCA</b>	<b>U. Saad Dahleb, Blida 1</b>	<b>Examineur</b>
<b>Lazazi MENAA</b>	<b>MCA</b>	<b>U. Yahia Fares, Médéa</b>	<b>Examineur</b>
<b>Salima AMRI</b>	<b>MCA</b>	<b>U. Yahia Fares, Médéa</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>Younes ABED</b>	<b>MCA</b>	<b>U. Saad Dahleb, Blida 1</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Kamil KAYABALI</b>	<b>Professeur</b>	<b>U. d'Ankara, Turquie</b>	<b>Co-rapporteur</b>

**Blida, 2024**

## 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 aux différents laboratoires tels que (laboratoire de mécanique des sols de l'université Blida 01, Laboratoire de mécanique des sols de l'école supérieure de l'hydraulique, laboratoire de mécanique des sols de l'université Mohamed khider Biskra et laboratoire de la géotechnique et la géologie de l'université d'Ankara). 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 veux remercier mon premier Directeur de thèse **Pr. Zine-Elabideene Zitouni**, malgré son décès au début de la 2<sup>ème</sup> année d'inscription.

Je remercie mon Directeur de thèse, **Dr. Younes ABED** pour avoir accepté d'assumer le rôle de Directeur de ma thèse au cours de ces années, pour son soutien indéfectible, ses précieux conseils, et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ces années de recherche. Son expertise et sa disponibilité ont été des sources d'inspiration inestimables.

Je tiens particulièrement à exprimer mes chaleureux remerciements à mon Co-directeur de thèse **Pr. Kamil KAYABALI de l'université d'Ankara, Turquie**, qui m'a accueilli au sein de son laboratoire de recherche au cours de mon séjour (2023), je passe mes sincères remerciements au **Dr. Turgay BEYAZ** chercheur assistant à l'université d'Ankara 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 remercie en particulier **Pr. Djillali AMAR BOUZID** pour avoir bien voulu accepter d'être président de jury de ce travail de recherche. Je tiens aussi à remercier les membres du jury:

**Dr. Yacine SAIL, Dr. Lazazi MENAA et Dr. Salima AMRI** qui nous m'ont honoré d'avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

Je remercie également le Directeur de laboratoire NEIGE le **Pr Djillali AMAR BOUZID** 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.

Je tiens à adresser mes profonds remerciements au **Dr. Sadok FEIA**, Maître de conférences à l'université de Biskra, et le **Dr. Sid-Ali DENINE** Maître de conférences au Centre Universitaire de Tipaza pour avoir participé au suivi à l'orientation de mon travail.

J'adresse mes remerciements au **Dr. Hamza BENSACI**, Maître de conférences à l'université de Blida, **Dr. Yahiaoui Walid** directeur de laboratoire Matériaux de génie civil, **Mr. Abdelkader Fertas**, le technicien de Laboratoire de l'Université de Blida, pour leurs aides considérables sans oublié de remercier **Mr. Bouziane HAMOUD** et **Mr. Boudani TAKI**, Ingénieurs au laboratoire à l'ENSH de Blida et **M<sup>lle</sup>. Khinech RAHOUA** Ingénieure au laboratoire de l'université de Biskra.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants et personnel du département de génie civil de l'université de Blida<sup>1</sup>, en particulier, **Pr. Ali Bouafia** et tous ceux qui ont participé et contribué à l'élaboration de ce travail.

## DEDICACE

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

*A mon cher père, Mohamed,*

*Tu as toujours été pour moi l'exemple d'un père respectueux, honnête et méticuleux, et je voudrais honorer l'homme que tu es. Grâce à toi, papa, j'ai appris le sens du travail et des responsabilités. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension...*

*Ton soutien a été un phare tout au long de ma vie. Aucune dédicace ne peut exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eus pour toi. Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.*

*À mes frères et sœurs,*

*Pour leur amour, leur soutien et leur présence réconfortante tout au long de cette aventure.*

*À ma belle-famille BAGHDIR*

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

*Sans vous, cette aventure « incroyable » n'aurait pas été la même.*

## RESUME



L'utilisation des techniques de renforcement par les fibres recyclée ou synthétiques et le traitement par le biopolymère permet d'améliorer les propriétés des sols, selon le domaine ou la fonction de l'ouvrage. Ces matériaux synthétiques ou bien déchets plastique qui sont de plus en plus utilisés sous forme de fibres discrète, représentent une alternative éco-environnement et techniquement intéressante. L'objectif des recherches menées dans le cadre de cette thèse, consiste à mettre en évidence, l'influence du fibres de plastique recyclé, synthétiques et le biopolymère sur le comportement mécanique d'un sol sableux (sable de la région de Zemmouri, sable de dune de la région d'El-Hadjeb, et sable de oued souf), par exemple le sable de Zemmouri qui a connu beaucoup de phénomènes d'instabilité lors du séisme de Zemmouri en 2003, et de voir à quel teneur en fibre et en bio polymère commence à contribuer à l'effort de cisaillement.

Une étude expérimentale préliminaire portant sur le comportement des sols sableux renforcés, par des fibres et le bio polymère a été menée. Les essais de cisaillement direct ont été effectués pour étudier l'influence de l'humidité et de la teneur en fibre sur le comportement mécanique des sables. Cette recherche portera sur la comparaison entre les résultats obtenus pour les échantillons secs ( $W = 0\%$ ) non renforcés à ceux humides ( $W = 4\%$ ), sous diverses pressions de confinement (50, 100 et 200kPa). Par la suite, le renforcement de sable avec des fibres en plastique ( $f_b = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  et  $1\%$ ) montre d'une manière générale que l'ajout des fibres permet l'amélioration de la résistance au cisaillement, en limitant la contractance du sol. En outre, les essais de compression simple sur les échantillons de sable de dune, ont permis d'étudier le comportement mécanique du sable de sud Algérienne mélangé avec des quantités variables de bio polymère et renforcé par la fibre de polypropylène. Nous avons constaté que la contribution de bio polymère augmente la résistance à la compression du sable pour toutes les teneurs en bio polymère examinées, l'incorporation des fibres de polypropylène augmente la résistance à la compression à certain teneur en fibre au-delà de cette pourcentage la résistance mécanique commence à diminuer.

Une investigation en complément des essais triaxiaux consolidé drainé et des essais de cisaillement cyclique sur un sable d'Oued Souf ont été effectués pour évaluer l'effet de la teneur en fibre de polypropylène sur la résistance au cisaillement sous différents contrainte de confinement (50, 100 et 200 kPa). Les essais montrent que la teneur en fibre affecte d'une manière considérable la résistance au cisaillement du sable.

Aussi, il a été constaté à travers les essais cycliques des sols renforcés par les fibres de polypropylène exercent réellement une influence sur l'efficacité du renforcement.

L'étude numérique pour compléter les essais expérimentaux nous ont permis de définir un

modèle en 2D, basé sur la méthode des éléments finis dans le logiciel PLAXIS 2D (8.2). Une loi de comportement de Mohr-Coulomb a été utilisée pour simuler le comportement d'un matériau granulaire non renforcé par des teneurs en fibre. Après avoir comparé les résultats numériques et expérimentaux, nous avons constaté une bonne compatibilité des résultats.

**Mots-clés :** Sable, Bio polymère, Fibre recyclée, Cisaillement, Chargement monotone, Renforcement des sols, Chargement cyclique.

**ABSTRACT**

The use of reinforcement techniques based on recycled or synthetic fibres and biopolymer treatment makes it possible to improve the properties of soils, depending on the field or function of the structure. These synthetic or waste plastic materials, which are increasingly used in the form of discrete fibres, represent an eco-environmentally and technically interesting alternative. The aim of the research carried out as part of this thesis is to highlight the influence of recycled plastic fibres, synthetics and biopolymer on the mechanical behaviour of a sandy soil (sand from the Zemmouri region, dune sand from the El-Hadjeb region, and Oued Souf sand), for example the Zemmouri sand which experienced many instability phenomena during the Zemmouri earthquake in 2003, and to see at what fibre and biopolymer content it begins to contribute to the shear stress.

A preliminary experimental study of the behaviour of sandy soils reinforced with fibre and bio-polymer was carried out. Direct shear tests were carried out to study the influence of moisture and fibre content on the mechanical behaviour of sands. This research will focus on comparing the results obtained for dry ( $W = 0\%$ ) unreinforced samples with wet ( $W = 4\%$ ) samples, under various confinement pressures (50, 100 and 200KPa). Subsequently, the reinforcement of sand with plastic fibres ( $f_b = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  et  $1\%$ ) generally shows that the addition of fibres improves the shear strength, by limiting the contracting of the soil. In addition, simple compression tests on dune sand samples were used to study the mechanical behaviour of southern Algerian sand mixed with varying quantities of bio-polymer and reinforced with polypropylene fibre. We observed that the contribution of bio-polymer increases the compressive strength of the sand for all the bio-polymer contents examined, while the incorporation of polypropylene fibre increases the compressive strength at a certain fibre content above which the mechanical strength begins to decrease.

An investigation in addition to drained consolidated triaxial tests and cyclic shear tests on Oued Souf sand was carried out to assess the effect of polypropylene fibre content on shear strength under different confinement stresses (50, 100 and 200 KPa). The tests showed that the fibre content significantly affected the shear strength of the sand.

It was therefore found that the cyclic testing of polypropylene fibre-reinforced soils had a real influence on the effectiveness of the reinforcement.

The numerical study to complement the experimental tests enabled us to define a 2D model, based on the finite element method in the PLAXIS 2D software (8.2). A Mohr-Coulomb behaviour law was used to simulate the behaviour of a granular material not reinforced with fibre de polypropylene. After comparing the numerical and experimental results, we found good compatibility between the results.

**Key words:** Sand, Bio-polymer, Recycled fibre, Shear, Monotonic loading, Soil reinforcement, Cyclic loading.

إن استخدام تقنيات التعزيز القائمة على الألياف المعاد تدويرها أو الألياف الاصطناعية ومعالجة البوليمر الحيوي يجعل من الممكن تحسين خصائص التربة، اعتمادًا على مجال أو وظيفة الهيكل. وتمثل هذه المواد البلاستيكية الاصطناعية أو النفايات البلاستيكية، التي يتم استخدامها بشكل متزايد في شكل ألياف منفصلة، بديلاً مثيلاً للاهتمام من الناحية البيئية والتقنية. الهدف من البحث الذي تم إجراؤه كجزء من هذه الأطروحة هو تسليط الضوء على تأثير الألياف البلاستيكية المعاد تدويرها والمواد الاصطناعية والبوليمر الحيوي على السلوك الميكانيكي للتربة الرملية (رمال من منطقة زموري، رمال الكثبان الرملية من منطقة الحاجب ورمال وادي سوف)، على سبيل المثال رمال زموري التي شهدت العديد من ظواهر عدم الاستقرار خلال زلزال زموري في عام 2003، ومعرفة محتوى الألياف والبوليمر الحيوي الذي يبدأ في المساهمة في إجهاد القص.

أجريت دراسة تجريبية أولية لسلوك التربة الرملية المعززة بالألياف والبوليمر الحيوي. تم إجراء اختبارات القص المباشر لدراسة تأثير الرطوبة ومحتوى الألياف على السلوك الميكانيكي للرمال. سيركز هذا البحث على مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها للعينات الجافة ( $W = 0\%$ ) غير المقواة بالعينات الرطبة ( $W = 4\%$ )، تحت ضغوط حصر مختلفة (50 و100 و200 كيلو باسكال). بعد ذلك، فإن تقوية الرمل بالألياف البلاستيكية (0.2؛ 0.4؛ 0.6؛ 0.8 و1%) تُظهر بشكل عام أن إضافة الألياف تحسن من قوة القص، عن طريق الحد من تقلص التربة. وبالإضافة إلى ذلك، تم استخدام اختبارات ضغط بسيطة على عينات من رمال الكثبان الرملية لدراسة السلوك الميكانيكي لرمال جنوب الجزائر الممزوجة بكميات متفاوتة من البوليمر الحيوي والمدعمة بألياف البولي بروبيلين. وقد وجدنا أن مساهمة البوليمر الحيوي تزيد من قوة انضغاط الرمال لجميع محتويات البوليمر الحيوي التي تم فحصها، في حين أن دمج ألياف البولي بروبيلين يزيد من قوة الانضغاط عند محتوى معين من الألياف تبدأ القوة الميكانيكية في الانخفاض فوقه.

تم إجراء تحقيق بالإضافة إلى اختبارات ثلاثية المحاور المدمجة المجففة واختبارات القص الدورية على رمال وادي سوف لتقييم تأثير محتوى ألياف البولي بروبيلين على قوة القص تحت ضغوطات حبس مختلفة (50 و100 و200 كيلوباسكال). أظهرت الاختبارات أن محتوى الألياف أثر بشكل كبير على قوة القص للرمل.

وبالتالي تبين أن الاختبارات الدورية للتربة المعززة بألياف البولي بروبيلين كان لها تأثير حقيقي على فعالية التعزيز. مكنتنا الدراسة العددية المكتملة للاختبارات التجريبية من تحديد نموذج ثنائي الأبعاد، استنادًا إلى طريقة العناصر المحدودة في برنامج (PLAXIS 2D 8.2). تم استخدام قانون موهر-كولوم لمحاكاة سلوك المادة الحبيبية غير المدعمة بالألياف. بعد مقارنة النتائج العددية والتجريبية، وجدنا توافقًا جيدًا بين النتائج.

**الكلمات المفتاحية:** الرمل، البوليمر الحيوي، الألياف المعاد تدويرها، القص، التحميل الأحادي، تقوية التربة، التحميل الدوري.

REMERCIEMENTS .....	2
DEDICACE.....	4
RESUME.....	4
ABSTRACT .....	6
TABLE DES MATIERES.....	9
LISTE DES FIGURES .....	14
LISTE DES TABLEAUX .....	20
NOMENCLATURE DE BASE .....	22
INTRODUCTION GENERALE.....	23
<b>CHAPITRE I : COMPORTEMENT MECANIQUE DES SABLES ET PARAMETRES</b>	
<b>INFLUENTS</b>	
1.1 Introduction.....	27
1.2 Comportement mécanique des sables .....	27
1.2.1 L'essai triaxial .....	28
1.3 Concepts Rhéologique des sables .....	29
1.3.1 La contractance et la dilatance des sols granulaire.....	30
1.3.2 Etat critique.....	31
1.3.3 Etat caractéristique .....	34
1.4 Comportement des sables sous chargement monotone et cyclique .....	35
1.4.1 Comportement des sables sous chargement monotone .....	35
1.4.1.1 Comportement drainé .....	35
1.4.1.2 Comportement non drainée.....	37
1.4.2 Comportement des sables sous chargement cyclique.....	38
1.4.2.1 Comportement cyclique drainée .....	39
1.4.2.2 Comportement cyclique non drainée .....	41
1.5 Paramètres influant sur la résistance au cisaillement des sables.....	42
1.5.1 L'état de contrainte actuel .....	42
1.5.2 Influence de la densité relative .....	43
1.5.3 Présence de fines .....	45
1.5.4 Influence de la saturation.....	48
1.5.5 Influence de la méthode de préparation.....	48
1.5.6 Le préchargement .....	49
1.6 Conclusion .....	51
<b>CHAPITRE II : RENFORCEMENT PAR FIBRE ET LE TRAITEMENT PAR LES</b>	

## **BIOPOLYMERS**

2.1	Introduction.....	53
2.2	Renforcement des sols par l'utilisation des fibres .....	54
2.3	Différents type de fibres .....	56
2.3.1	Fibres artificiel synthétiques.....	56
2.3.1.1	Polyacrylamide (PAM) .....	56
2.3.1.2	Fibres de polypropylène (PP) .....	56
2.3.1.3	Fibres de polyester (PE).....	57
2.3.1.4	Fibres de verre .....	57
2.3.2	Fibres Naturelles.....	58
2.4	Paramètres influant sur le comportement des sols renforcés par des fibres .....	61
2.4.1	L'effet des caractéristiques du sol.....	61
2.4.1.1	L'influence de la morphologie des grains .....	61
2.4.1.2	La taille des grains .....	62
2.4.2	L'effet des propriétés des fibres .....	63
2.4.2.1	L'effet de type des fibres .....	63
2.4.2.2	La teneur en fibres .....	66
2.4.2.3	La longueur des fibres.....	69
2.4.2.4	Application de renforcement des sols par l'utilisation des fibres.....	71
2.5	Traitement des sols par l'utilisation les biopolymers .....	72
2.5.1	Biopolymères les plus utilisés dans l'ingénierie géotechnique.....	74
2.5.1.1	La gomme de xanthane .....	74
2.5.1.2	La gomme d'agar.....	79
2.5.1.3	La gomme de guar .....	82
2.6	Conclusion .....	85

## **CHAPITRE III : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET CARACTERISATIONSDES MATERIAUX UTILISES**

3.1	Introduction.....	87
3.2	3.2. Dispositif expérimental.....	87
3.2.1	3.2.1. Essai à la boîte de cisaillement.....	87
3.2.1.1	Principe de l'essai .....	87
3.2.1.2	Dispositif expérimental.....	87
3.2.1.3	Mode opératoire .....	88
3.2.1.4	Préparation des échantillons .....	89
3.2.2	Essai à l'appareil triaxial .....	91

	12
3.2.2.1 Principe de l'essai .....	91
3.2.2.2 Appareillage .....	91
3.2.2.3 Procédures d'essai et méthodes opératoires .....	93
3.2.3 Essai de cisaillement simple dynamique .....	96
3.3 Matériaux utilisés.....	98
3.3.1 Sol.....	98
3.3.2 Les matériaux de renforcement et de traitement .....	100
3.4 Conclusion .....	102
<b>CHAPITRE IV : COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN SABLE RENFORCES</b>	
<b>PAR DES FIBRES RECYCLEE</b>	
4.1 Introduction.....	104
4.2 Effet de la teneur en fibre.....	104
4.2.1 Échantillon lâche ( $D_r=25\%$ ).....	104
4.2.2 Sable moyennement dense ( $D_r=49\%$ ).....	106
4.3 Effet de la teneur en fibre sur la cohésion et l'angle de frottement .....	107
4.3.1 Échantillons lâches .....	107
4.3.2 Échantillons moyennement denses.....	108
4.4 Effet de teneur en fibre sur la contractance et la dilatance .....	109
4.5 Conclusion .....	110
<b>CHAPITRE V : COMPORTEMENT MECANIQUE DES SABLES TRAITE PAR</b>	
<b>BIOPOLYMER ET RENFORCER PAR DES FIBRES</b>	
5.1 Introduction.....	113
5.2 Résistance à la compression non confinée du sable de dune traité à la gomme de xanthane.....	113
5.3 Effet de la gomme xanthane traitée des sables de dune sur l' $UCS_{max}$ .....	115
5.4 Effet de la teneur en fibres sur la résistance à la compression non confinée du sable traité à la gomme xanthane .....	116
5.5 Résistance maximale à la compression pour tous les échantillons.....	117
5.5.1 Variation de la résistance maximale à la compression du sable fin traité avec différentes teneurs en XG et en fibres.....	117
5.5.2 Effet de la longueur des fibres et de la teneur en XG sur la résistance au pic du sable fin .....	118
5.5.3 Effet de la teneur en XG sur $E_{50}$ avec différents temps de cure .....	119
5.5.4 Effet de la teneur en fibres et de la gomme xanthane sur $E_{50}$ avec différents temps de cure.....	120



5.6	Structure microscopique du sable de dune traité par un mélange de XG et de fibres ...	121
5.7	Conclusion .....	123

## **CHAPITRE VI : COMPORTEMENT MONOTONE ET CYCLIQUE DE SABLE DE DUNDE RENFORCE PAR FIBRE DE PP**

6.1	Introduction.....	125
6.2	Comportement mécanique d'un sable non renforcée.....	125
6.3	Comportement mécanique d'un sable traité avec le biopolymère .....	126
6.4	Résultats des essais drainés sur sable traité par XG et renforcé par les fibres de PP ....	127
6.5	Effet de renforcement sur $Q_{max}$ .....	131
6.6	Coefficient de renforcement ( $S_r$ ) .....	132
6.7	Comportement cyclique .....	133
6.7.1	Effet de teneur fibre sur la boucle d'hystérésis .....	133
6.7.2	Effet de teneur fibre sur la pression l'eau interstitielle .....	134
6.7.3	Effet de la teneur en fibres sur l'énergie de dissipation .....	135
6.8	Conclusion .....	137

## **CHAPITRE VII : Modélisation Numérique**

7.1	Introduction :.....	139
7.2	Configuration de modèle .....	139
7.3	La géométrie du modèle .....	139
7.4	Propriétés du sable .....	141
7.5	Présentation des résultats .....	142
7.5.1	Effet de teneur en fibre et la contrainte de confinement sur le déviateur de contrainte.....	142
7.5.2	Effet de teneur en fibre sur la variation de la contrainte effective .....	144
CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....		146
RECOMMANDATIONS .....		150
ANNEXES .....		151
REFERENCES .....		159

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I : COMPORTEMENT MECANIQUE DES SABLES ET PARAMETRES INFLUENTS

Figure 1. 1: Propriétés Typique de résistance au cisaillement du sable .....	28
Figure 1. 2: (a) le champ de contrainte dans un essai triaxial, (b) Dispositif de l'essai triaxial .....	29
Figure 1. 3: Essai triaxial sur un sable, lâche ou dense. ....	30
Figure 1. 4: Comportement mécanique de sables dense et lâche : a) essai drainé, b) essai non drainé .....	31
Figure 1. 5: Essais triaxiaux sur des échantillons "lâches" et "denses" d'un sable typique : (a) courbes contrainte-déformation ; (b) variations du taux de vide pendant le cisaillement.....	32
Figure 1.6: Ligne d'état critique démontrée avec un appareil de cisaillement direct .....	33
Figure 1. 7: Représentation de l'état critique .....	34
Figure 1. 8: Représentation des lignes caractéristiques dans le plan (q, p') .....	35
Figure 1. 9: Résultats d'essais triaxiaux drainés typiques sur du sable lâche de la rivière Sacramento: (a) rapport de contrainte principale en fonction de la déformation axiale ; (b) déformation volumique en fonction de la déformation axiale.....	36
Figure 1. 10: Résultats d'essais triaxiaux drainés typiques sur du sable dense de la rivière Sacramento: (a) rapport de contrainte principale en fonction de la déformation axiale; (b) déformation volumétrique en fonction de la déformation axiale. ....	37
Figure 1. 11: Essais triaxiaux monotones non drainés (A,B,C) et drainé (D) sur sable .....	38
Figure 1. 12: Différents phénomènes cycliques observés .....	39
Figure 1. 13: Différents comportements cycliques drainés du sable.....	40
Figure 1. 14: Essais triaxiaux cycliques drainés à contrainte contrôlé.....	41
Figure 1. 15: Diagramme caractéristique du comportement en condition non drainés du sabl .....	42
Figure 1. 16: Etat de contrainte initial d'un élément de sol au repos.....	43
Figure 1. 17: Influence de l'indice des vides sur le comportement monotone non drainé du sable de Toyoura.....	43
Figure 1. 18: L'effet de l'indice des vides sur la résistance au cisaillement cyclique .....	44
Figure 1. 19: Effet de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction du sable de Chlef ...	44
Figure 1. 20: Schématisation de la densification après le cisaillement de la structure d'après .....	45
Figure 1. 21: L'influence de la teneur des fines sur le comportement non drainé d'un mélange	

sable-limon .....	46
Figure 1. 22: Influence de la fraction des fines sur l'angle de frottement et l'angle caractéristique.....	47
Figure 1. 23: Effet de fines peu plastiques sur la résistance à la liquéfaction cyclique. ....	47
Figure 1. 24: Influence du coefficient de Skempton (B) sur le comportement non drainé du sable de Chlef .....	48
Figure 1. 25: Courbes a) de la contrainte déviatorique $q(\varepsilon_1)$ et b) de la déformation volumétrique $\varepsilon_v(\varepsilon_1)$ 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). ....	49
Figure 1. 26: Influence d'un préchargement cyclique sur résistance au cisaillement non drainé du mélange sable de Rass- limon SM (FC = 10%, $I_d = 0,65$ ).....	50

## **CHAPITRE II : RENFORCEMENT PAR FIBRE ET LE TRAITEMENT PAR LES BIOPOLYMERS**

Figure 2. 1: Différentes méthodes de renforcement du sol .....	54
Figure 2. 2: Mécanisme de l'interaction sol-fibre .....	55
Figure 2. 3: Fibres synthétiques : (a) fibres de polypropylène (PP), (b) fibres de verre .....	58
Figure 2. 4: Classification des fibres naturelles selon .....	59
Figure 2. 5: Les fibres végétales (a) Fibre de sisal, (b) Fibre de Coir .....	60
Figure 2. 6: Fibres de basalte.....	61
Figure 2. 7: Évolution de la granulométrie au cours de la compression isotrope à environ 50 MPa pour les échantillons de sable et de mélange fibres-sable.....	62
Figure 2. 8: Relation entre le rapport de contrainte et la déformation axiale pour toutes les teneurs en fibres et différentes densités relatives initiales.....	63
Figure 2. 9: Utilisation de géotextiles de jute pour le contrôle de l'érosion et la stabilisation des pentes (projet pratique réalisé au Vietnam, 2022-2023).....	64
Figure 2. 10: Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction de la teneur en matière plastique .....	65
Figure 2. 11: Courbes contrainte-déformation : (a) Fibre de bagasse (b) Fibre de basalte (c) Fibre de polyester. ....	66
Figure 2. 12: Effet sur les fibres de la résistance au cisaillement d'une pression de confinement de 200 KPa et d'une densité relative élevée $D_r = 87\%$ : (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 $\omega = 3\%$ . ....	67

Figure 2. 13: Résistance au cisaillement du sable propre renforcé sous une contrainte de confinement de 100 KPa ( $\omega = 3\%$ ), a contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal, b déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal. ....	68
Figure 2. 14: L'effet de teneur en fibre de carbone sur la résistance au cisaillement .....	68
Figure 2. 15: Relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation de cisaillement à différentes teneurs en fibres.....	69
Figure 2. 16: Influence de la longueur des fibres sur le rapport de contrainte (paramètre de la ligne d'état critique). ....	70
Figure 2. 17: Effet de la longueur des fibres sur la contrainte déviatorique pour a 50 KPa, b 100 KPa, et c 200 KPa.....	71
Figure 2. 18: 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). ....	72
Figure 2. 19: la structure chimique de la gomme de xanthane .....	74
Figure 2. 20: Spécimen de gomme xanthane immergé dans l'eau par (Bagheri et al., 2023) à a 1 h b 4 h c 1 jour d 5 jours.....	75
Figure 2. 21: Variation de l'UCS pour le sol traité au XG en fonction du temps de cure .....	75
Figure 2. 22: Résultats de l'essai de cisaillement direct du sol traité à la gomme xanthane : (a,c,e) courbes contrainte de cisaillement direct ( $\tau$ )-déplacement de cisaillement horizontal ( $\delta$ ) ; (b,d,f) courbes de déformation verticale ( $\varepsilon_v$ )-déplacement horizontal en cisaillement ( $\delta$ ). ....	77
Figure 2. 23: Évolution de la résistance au cisaillement en fonction du déplacement horizontal d'échantillons de sable non traités et traités à la gomme xanthane à différentes teneurs en gomme xanthane et périodes de durcissement de : (a) 7 jours, (b) 14 jours, (c) 30 jours. ....	78
Figure 2. 24: Évolution des propriétés de résistance au cisaillement des échantillons de sable non traités et traités à la gomme xanthane à différentes teneurs en gomme xanthane et périodes de durcissement : (a) intercept de cohésion (b) angle de frottement interne. ....	78
Figure 2. 25: Comportement de la résistance au cisaillement du sable traité à la gomme xanthane.....	79
Figure 2. 26: Structure chimique de la gomme agar .....	80
Figure 2. 27: Résistance à la compression non confinée en fonction du temps pour (a) un sol argileux traité aux biopolymères et (b) un sol sableux traité aux biopolymères et séché à l'air à température ambiante ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ). ....	81
Figure 2. 28: La résistance à la compression non confinée en fonction du temps pour un sol sableux traité aux biopolymères et séché à l'air à température ambiante ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ). ....	81

Figure 2. 29: La structure de la gomme guar.....	82
Figure 2. 30: La résistance à la compression en fonction de la période de cure du sol traité à la gomme de guar d'après.....	83
Figure 2. 31: Enveloppes de rupture des mélanges sable/biopolymère avec une concentration de 2 % et un temps de durcissement de 5 semaines. ....	83
Figure 2. 32: Comportement contrainte-déformation d'un sol non traité et d'un sol traité à la gomme de guar. ....	84
Figure 2. 33: Résultats de l'essai de cisaillement direct d'un sol latéritique traité avec la gomme Guar .....	85

### **CHAPITRE III : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET CARACTERISATIONS DES MATERIAUX UTILISES**

Figure 3. 1: Boite de cisaillement direct du laboratoire de mécanique de sol (ENSH BLIDA) .....	88
Figure 3. 2: Boîte de cisaillement.....	88
Figure 3. 3: Mélange de sable et de fibres : (a) fibre de polypropylène ; (b) fibre de plastique recyclée.....	90
Figure 3. 4: Préparation des échantillons pour (a) les échantillons secs ; (b) les échantillons humides.....	90
Figure 3. 5: Etat de contraintes dans un essai triaxial .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 3. 6: Vue générale du dispositif triaxial .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 3. 7: Schéma de la cellule triaxiale utilisée.....	92
Figure 3. 8: Système de pression avec les cellules Air-eau.....	92
Figure 3. 9: Système de pilotage et d'acquisition.....	93
Figure 3. 10: La mise en place de l'échantillon.....	93
Figure 3. 11: Préparation de l'éprouvette.....	94
Figure 3. 12: Cisaillement de l'éprouvette .....	95
Figure 3. 13: Dispositif de cisaillement simple cyclique utilisé dans cette étude .....	96
Figure 3. 14: Les différentes phases de la préparation de l'échantillon.....	98
Figure 3. 15: Courbe granulométrique du sable utilisé .....	99
Figure 3. 16: Image MEB de (a) sable de Djamaa (S1), (b) sable El-Hadjeb (S2) et (c) Sable de Zemmouri (S3).....	99
Figure 3. 17: Fibre recyclé.....	100
Figure 3. 18: Fibres de polypropylène utilisées dans cette étude .....	101
Figure 3. 19: Le biopolymère xanthane utilisée dans cette étude.....	102

### **CHAPITRE IV : COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN SABLE RENFORCES**

## PAR DES FIBRES RECYCLEE

Figure 4. 1: Effet de la teneur en fibres sur la résistance au cisaillement, contrainte normale de 200KPa et densité moyenne $D_r=25\%$ : (a) variation de la résistance au cisaillement du sable sec en fonction du déplacement horizontal $\delta H$ (mm), (b) variation de la résistance au cisaillement en fonction du déplacement horizontal $\delta H$ (mm) avec une teneur en eau $W=4\%$ , (c) courbes intrinsèques du sable sec, (d) courbes intrinsèques du sable humide avec ( $w=4\%$ )	105
Figure 4. 2: Effet de la teneur en fibres sur la résistance au cisaillement, contrainte normale de 200KPa et densité moyenne $D_r=49\%$ : (a) variation de la résistance au cisaillement du sable sec en fonction du déplacement horizontal $\delta H$ (mm), (b) variation de la résistance au cisaillement en fonction du déplacement horizontal $\delta H$ (mm) avec une teneur en eau $W=4\%$ , (c) courbes intrinsèques du sable sec, (d) courbes intrinsèques du sable humide avec ( $w=4\%$ )	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 4. 3: Effet de la teneur en fibres du sable lâche sec et humide en fonction (a) la cohésion, (b) l'angle de frottement	108
Figure 4. 4: Effet de la teneur en fibres sur la cohésion et l'angle de frottement du sable moyennement dense renforcé, sec et humide : (a) Cohésion, (b) Angle de frottement	109
Figure 4. 5: Courbes de déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal pour des échantillons de sable lâche cisailés à 200 KPa, (a) sable sec, (b) sable humide.	110
Figure 4. 5: Courbes de déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal pour des échantillons de sable moyennement dense cisailés à 200KPa, (a) sable sec, (b) sable humide.	110
 <b>CHAPITRE V : COMPORTEMENT MECANIQUE DES SABLES TRAITE PAR BIOPOLYMER ET RENFORCER PAR DES FIBRES</b> 	
Figure 5. 1: Le séchage des échantillons à l'aire libre	113
Figure 5. 2: Résistance à la compression non confinée du sable traité avec la gomme xanthane, (a) 7jours, (b) 14jours et (c) 28jours	114
Figure 5. 3: Influence de la teneur en XG sur la résistance maximale des sables pour différents temps de durcissement	115
Figure 5. 4: Effet de la teneur en fibres sur le sable traité à la gomme xanthane	117
Figure 5. 5: Influence de la teneur en fibres et en XG sur la résistance au pic avec différentes périodes de durcissement	118
Figure 5. 6: Effet de la longueur des fibres sur la résistance à la compression du pic	119
Figure 5. 7: Effet de la teneur en gomme xanthane sur le module E50 avec différents temps de durcissement	119

Figure 5. 8: Effet de la teneur en fibres et du XG sur le module $E_{50}$ avec différents temps de cure .....	120
Figure 5. 9: Microstructure du sable traité par la gomme xanthane et renforcé par des fibres .....	122

## **CHAPITRES VI : COMPORTEMENT MONOTONE ET CYCLIQUE DE SABLE DE DUNDE RENFORCE PAR FIBRE DE PP**

Figure 6. 1: Comportement monotone drainé du sable de Djamaa non renforcé, (a) courbes déviateur contrainte vs déformation axiale obtenues à partir d'essais triaxiaux en CD (b) Courbes de déformation volumique vs déformation axiale obtenues à partir d'essais triaxiaux sur CD, (c) chemins de contraintes.....	126
Figure 6. 2: Essai de compression drainé sur sable de Djamaa traité par XG .....	127
Figure 6. 3: Essai de compression drainée sur sol renforcé par fibre de PP, ( $\sigma_c = 50$ KPa) ..	128
Figure 6. 3: Essai de compression drainée sur sol renforcé par fibre de PP, ( $\sigma_c = 100$ KPa)	128
Figure 6. 5: Essai de compression drainée sur sol renforcé par fibre de PP, ( $\sigma_c = 200$ KPa)	129
Figure 6. 6: Influence du teneur de fibre sur le chemin de contrainte du sable de Djamaa traité par 1% de XG, pour des contrainte de confinements: $\sigma_c=50$ KPa ; $\sigma_c =100$ KPa ; $\sigma_c =200$ KPa. ....	130
Figure 6. 7: Influence de teneur en fibre PP et XG sur le $Q_{max}$ .....	131
Figure 6. 8: Effet de teneur en fibre de PP à la présence de XG sur la variation du coefficient du renforcement.....	133
Figure 6. 9: (a) Boucle d'hystérésis typique sous cisaillement simple cyclique, (b) pression interstitielle au bas vs nombre de cycle d'un sable non renforcé.....	133
Figure 6. 10: Boucle d'hystérésis d'un sable non renforcé et renforcée avec différents teneur en fibre.....	134
Figure 6. 11: Variation de pression interstitielle avec le nombre de cycle pour les différents teneurs en fibre a) 50) ;KPa b) 100) ;KPa c) 200) ;KPa.....	135
Figure 6. 12: Variation de l'énergie de dissipation en fonction de teneur en fibre .....	136

## **CHAPITRE VII : Modélisation Numérique**

Figure 7. 1: (a) et (b) paramètres généraux de configuration. ....	139
Figure 7. 2: Modèle géométrique de l'essai triaxial sous chargement monotone.....	140
Figure 7. 3: Maillage du modèle.....	140
Figure 7. 4: Modèle de calcul .....	142
Figure 7. 5: Résultats expérimentaux et numériques: (a) $\sigma_c$ (50 KPa), (b) $\sigma_c$ (100 KPa) et (c) $\sigma_c$ (200 KPa).....	144
Figure 7. 6: La variation de la contrainte effective pour une même contrainte de confinement	

$\sigma_c=200$  KPa..... 145

**LISTE DES TABLEAUX**



## **CHAPITRE II : RENFORCEMENT PAR FIBRE ET LE TRAITEMENT PAR LES BIOPOLYMERS**

Tableau 2. 1 : Liste des fibres végétales avec leurs avantages et leurs applications. ....	60
Tableau 2. 2 : Classification des Biopolymères selon leur origine .....	73

## **CHAPITRE III : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET CARACTERISATIONS DES MATERIAUX UTILISES**

Tableau 3. 1 : Caractéristiques du sables étudié.....	100
Tableau 3. 2 : Paramètres de base de la fibre de polypropylène .....	101

## **CHAPITRES VI : COMPORTEMENT MONOTONE ET CYCLQUE DE SABLE DE DUNDE RENFORCE PAR FIBRE DE PP**

Tableau 6. 1: Les paramètres mécanique du sable de Djamaa traité.....	131
Tableau 6. 2: Valeurs maximales de déviateur de contrainte et du coefficient de renforcement pour les échantillons renforcés .....	132

## **CHAPITRE VII : Modélisation Numérique**

Tableau 7. 1: Propriétés du sable .....	141
-----------------------------------------	-----

## NOMENCLATURE DE BASE

$\gamma_w$	Poids volumique de l'eau.
$\sigma'_0$	Contrainte effective initiale.
$\varphi$	Angle de frottement interne
$\sigma_x$	Contrainte tangentielle (contrainte de cisaillement)
$C$	Cohésion
$\tau$	Contrainte tangentielle.
$q = (\sigma_1 - \sigma_3)$	Déviateur de contrainte,
$p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$	Contrainte moyenne totale,
$p' = p - \Delta u$	Contrainte moyenne effective,
$\eta = q/p$	Rapport de contraintes,
$\varepsilon_1$ ou $\varepsilon_a$	Déformation axiale,
$\varepsilon_3$	Déformation horizontale,
$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$	Déformation volumique,
$\varepsilon_d = 2/3(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)$	Déformation de déviateur.
$D_{50}$	Taille moyenne des grains
$f_c$	Teneur en fibre
$\sigma'_c$	Contrainte de confinement
$C_u$	Coefficient de l'uniformité
$C_c$	Coefficient de courbure
$\rho_s$	Poids volumique des grains solides
$\rho_a$	Poids volumique apparent
$e_{max}$	Indice des vides max
$e_{min}$	Indice des vides min
$D$	Diamètre des échantillons triaxiaux
$H$	Hauteurs des échantillons triaxiaux
$\Delta U$	Pression interstitielle
$\sigma'_1$	Contrainte effective principale majeur
$\sigma'_3$	Contrainte effective principale mineur
$B$	Coefficient de Skempton
$D_r$	Densité relative
$q$	Déviateur de contraintes
$\varepsilon_v$	Déformation volumique
$\varepsilon_a$	Déformation axiale
$\sigma_n$	Contrainte normale

## 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 sols 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 ces sols par le renforcement. Le travail de recherche proposé est donc destiné à étudier en laboratoire l'influence de l'ajout de renforts en fibres synthétiques et recyclées réparties 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 dans une première partie, une étude expérimentale en laboratoire, sur le comportement des mélanges sable-fibre renforcés ou non par les fibres (recyclée, synthétique), dans la partie expérimentale nous avons utilisé un ajout cimentaire de type biopolymère pour traiter les différents types de sols, en utilisant des dispositifs bien instrumentés. En deuxième partie, une étude numérique basée sur la méthode des éléments finis, permettant de simuler le comportement de sol traité par biopolymère et renforcé par des fibres synthétique.

Les travaux réalisés au cours de cette thèse pour effectuer ces objectifs comprennent notamment:

- Des essais d'identification de sable, de biopolymère et des matériaux synthétiques utilisés.
- Des essais de cisaillement direct à la boîte sur le sol de Zemmouri non renforcé et renforcé par des fibres recyclés, réalisés au niveau de laboratoire de mécanique des sols à ENSH de Blida.
- Des essais de compression nonconfinée, sur deux sables de dunes traité par biopolymère et renforcés par des fibres synthétique, réalisés au laboratoire de MDS à l'université Mohamed Khider de Biskra.
- Des essais triaxiaux monotones drainés, sur le sable de dune traité par biopolymère et renforcés par des fibres synthétique, réalisés au laboratoire de recherche (MDS) de

l'université de Ankara, Turquie.

- Des essais de cisaillement cyclique non drainés, sur le sable renforcés par des fibres synthétique, réalisés au laboratoire de recherche (MDS) de l'université de Ankara, Turquie.
- Une modélisation numérique des essais triaxiaux drainés sur le sable renforcée par des fibres synthétique utilisé pour la validation d'un modèle en utilisant le code de calcul par éléments finis PLAXIS (8.2).

Cette thèse est divisée en trois parties principales : une synthèse bibliographique, une étude expérimentale et une étude numérique.

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

Le deuxième chapitre aborde deux points principaux. Il couvre tout d'abord le renforcement des sols par fibres et les recherches associées. Deuxièmement, il passe en revue les facteurs qui influencent le comportement des composites sol-fibres. Ce chapitre examine également l'impact du rtraitement par les biopolymères sur les sols.

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

Dans le quatrième chapitre, on présente les résultats des essais à la boite de cisaillement direct. On montre en détail les résultats des essais réalisés sur les échantillons du sol non renforcés et renforcés par fibres recyclée distribuées aléatoirement ainsi que l'influence de la teneur de fibre et certain nombre 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 compression non confiné dans le but d'étudier l'influence de teneur en biopolymère et les fibres synthétique sur la résistance à la compression du sable renforcé. Les résultats des essais réalisés sur les échantillons de sol non renforcés et renforcés par différents teneurs de fibres et biopolymère sont représentés par les courbes de variation du déviateur en fonction de déformation axiale.

Dans le sixième chapitre, des résultats des essais triaxiaux drainé et des cyclique d'un sols sableux traité et renforcé par le biopolymère.

En dernier chapitre, une analyse numérique a été réalisée à l'aide du code de calcul en éléments finis PLAXIS 2D (8.2) dans le septième chapitre. Le but est donc de valider un modèle de comportement d'un sable traité et renforcer, avec une fiabilité acceptable, le comportement des sols non renforcés et renforcés par des fibre synthétique. Les résultats obtenus par le logiciel PLAXIS 2D (8.2) sont comparés à ceux réalisés expérimentalement sur le sable de Djamaa sous sollicitation triaxiale drainé.

Enfin, cette thèse se termine par des conclusions 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. Son 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 drainés. 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 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.

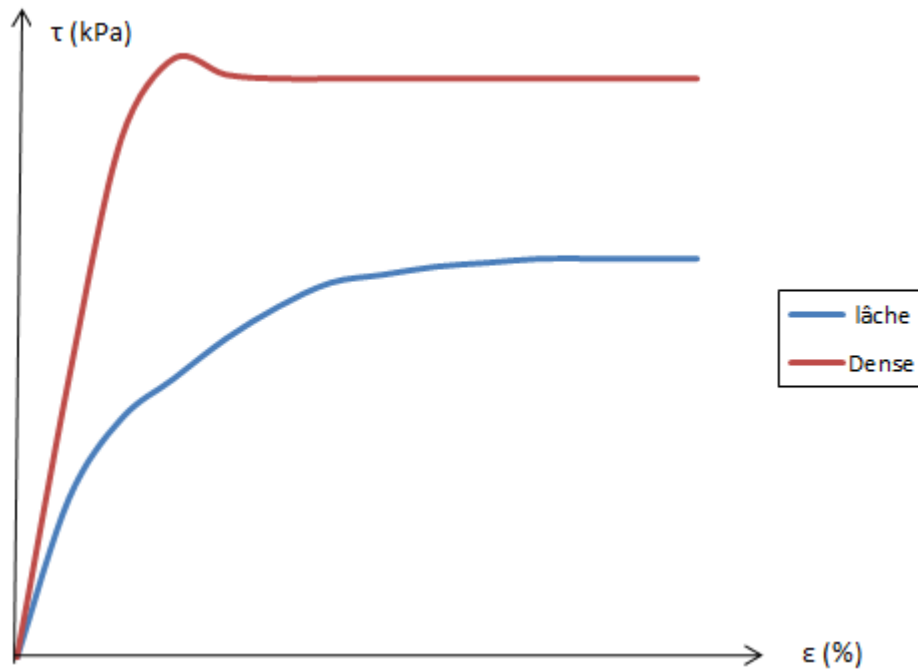


Figure 1. 1: Propriétés Typique de résistance au cisaillement du sable

### 1.2.1 L'essai triaxial

Il s'agit de l'essai de laboratoire le plus couramment utilisé en mécanique des sols pour évaluer la résistance au cisaillement du sol dans diverses conditions de drainage. L'essai consiste à placer un échantillon de sol cylindrique dans un état de contrainte uniforme, caractérisé par une contrainte horizontale et une contrainte verticale, comme l'illustre la figure 1.2 Ces essais sont particulièrement importants pour analyser la résistance au cisaillement et le comportement contrainte-déformation des sols dans différentes conditions de chargement. Les ingénieurs géotechniciens utilisent largement ces essais pour évaluer la stabilité des structures du sol telles que les fondations, les pentes et les remblais. Les paramètres étudiés dans cet essai sont les suivants :



Tableau 01 : les paramètres utilisé dans l'essai triaxial

$q = (\sigma_1 - \sigma_3)$	déviateur de contraintes
$p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)$	contrainte moyenne totale
$\Delta u$	surpression interstitielle
$p' = p - \Delta u$	contrainte moyenne effective
$\eta = \frac{q}{p}$	Rapport de contraintes
$\varepsilon_1$	déformation axiale
$\varepsilon_3$	déformation horizontale
$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$	déformation volumique
$\varepsilon_d = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$	déformation déviatorique

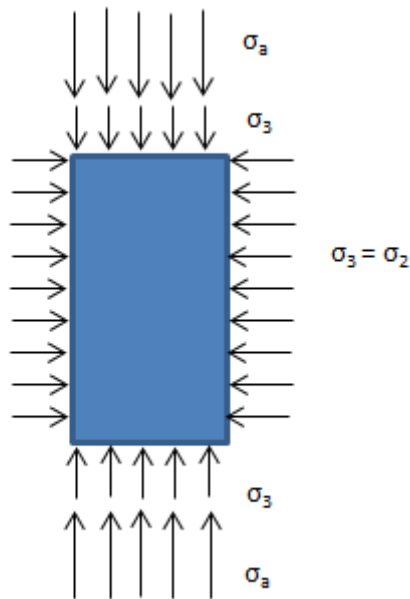


Figure 1. 2: le champ de contrainte dans un essai triaxial

### 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.

### 1.3.1 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.

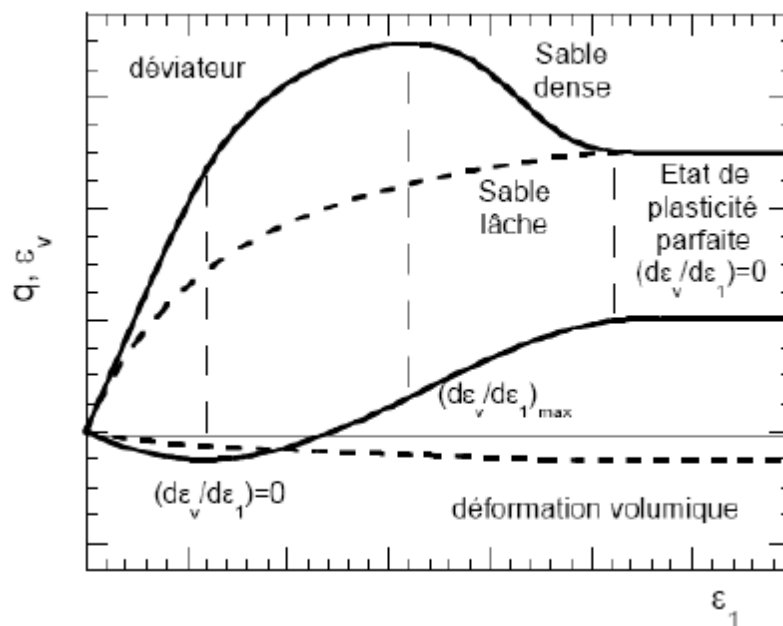


Figure 1. 3: Essai triaxial sur un sable, lâche ou dense (Dano, 2001).

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 1.3. 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 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 1.4b, 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 dilatance d'un sol est directement lié à son état initial, en particulier à sa densité initiale et à son niveau de contrainte de consolidation.

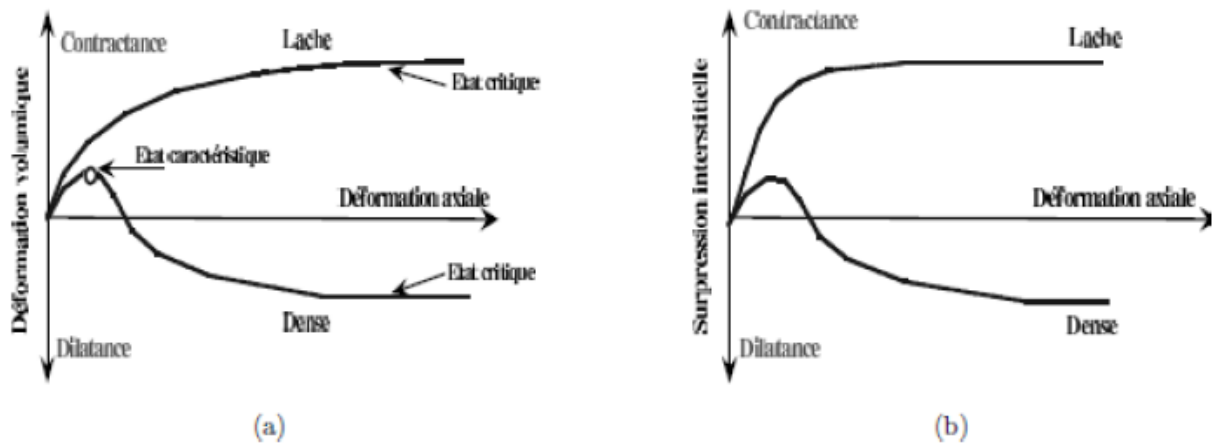


Figure 1. 4: Comportement mécanique de sables dense et lâche : a) essai drainé, b) essai non drainé. (Benziane, 2021)

### 1.3.2 Etat critique

La figure 1.5 présente les résultats d'une étude menée sur un sol pulvérulent (Robert D. Holtz et al 2023). L'étude a permis de soumettre les échantillons à un chargement dans une cellule triaxiale conventionnelle avec un déplacement contrôlé dans des conditions drainées, sous la même contrainte de confinement. L'étude a été réalisée avec deux indices de densité relative  $ID$  différents. Les résultats de l'étude indiquent que lorsque la déformation augmente, les

Indices de vide des sols lâches (ID faible) et denses (ID élevé) convergent vers une valeur en commun. Cette valeur est connue sous le nom d'indice de vide critique ecr, tel que défini par Casagrande. Elle correspond à l'état où le sol se déforme de manière continue sous une contrainte de cisaillement constante en conditions drainées.

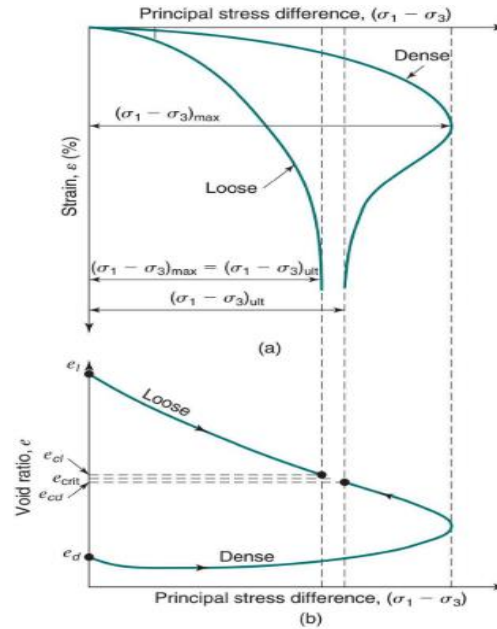


Figure 1. 5: Essais triaxiaux sur des échantillons "lâches" et "denses" d'un sable typique : (a) courbes contrainte-déformation ; (b) variations du taux de vide pendant le cisaillement.

(Robert D. Holtz et al 2023)

L'indice de vide critique n'est pas une constante par rapport à un matériau, mais dépend uniquement de la contrainte normale. La représentation de tous les points critiques dans un plan "e-log (p')" permet de tracer la ligne de l'indice de vide critique nommée "e\_cr" (figure 1.5). Roscoe et al 1958 ont appelé cette ligne "ligne d'état critique" et Castro 1969 a développé cette ligne en "ligne d'état stable". La ligne limite le domaine de contraction du domaine de dilatation, de sorte que cette ligne unique peut être utilisée pour évaluer la susceptibilité d'un échantillon de sol à la liquéfaction. Un sol saturé dont l'état initial se situe au-dessus de cette ligne est susceptible de se liquéfier. Inversement, un sol dont l'état initial se situe en dessous de cette ligne est virtuellement résistant au phénomène (figure 1.6).

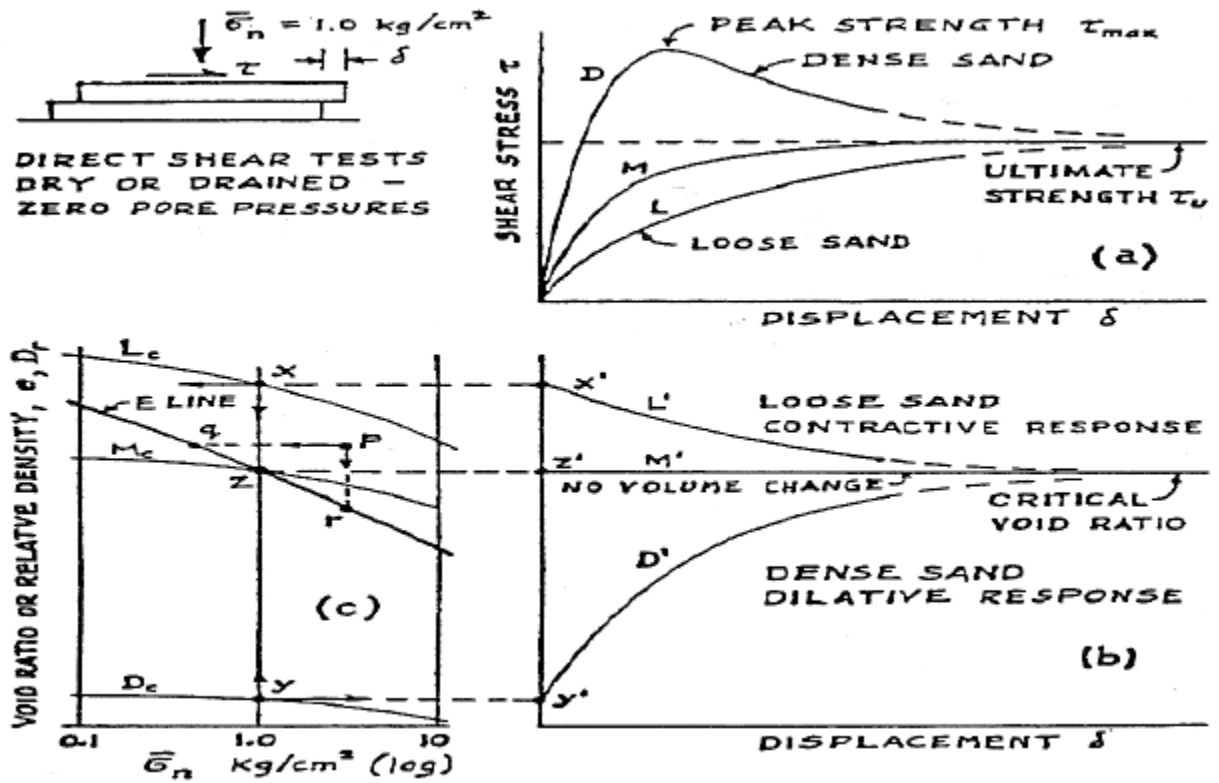


Figure 1.6: Ligne d'état critique démontrée avec un appareil de cisaillement direct  
(Casagrande, 1936)

La figure 1.7 présente une ligne appelée C.S.L. dans différents plans de l'essai triaxial. Selon (Wroth, 1988), l'état critique est un état où le sol tend à s'écouler comme un fluide visqueux lorsqu'il est soumis à un cisaillement continu. Dans le plan contrainte-déformation, l'état critique, tel que défini ci-dessus, correspond à un point situé entre la valeur maximale et la valeur résiduelle de la contrainte de cisaillement. Par ailleurs, cette définition ne tient pas compte de la réorientation ou de la dégradation d'une structure ou d'un grain spécifique.

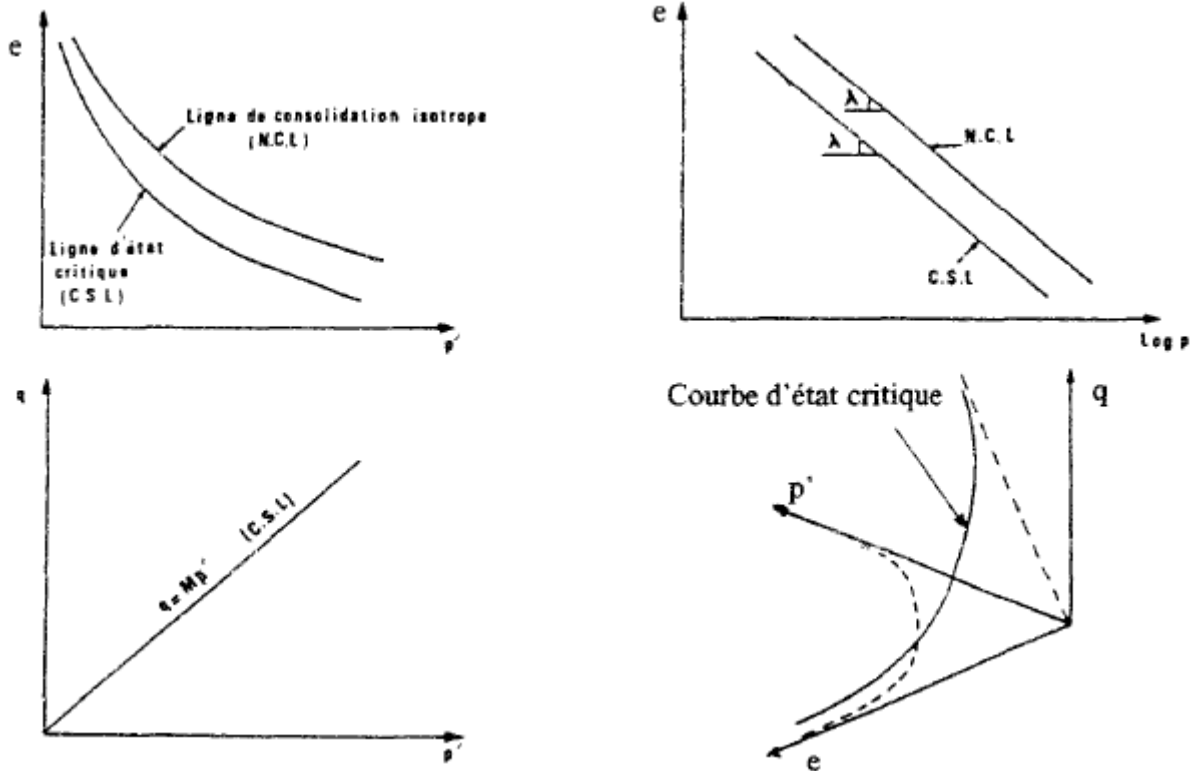


Figure 1. 7: Représentation de l'état critique (Bahda, 2010)

### 1.3.3 Etat caractéristique

Les études de (Phong Luong, 1978), (Habib et Luong, 1978) et (Sidaner, 1981) montrent que le concept d'état critique se définit comme l'état d'un matériau lorsqu'il passe d'un comportement contractant à un comportement dilatant sous l'effet d'une charge de cisaillement dans des conditions drainée ou non-drainée. Cet état peut être représenté par une droite passant par l'origine avec une pente de  $\eta_c = \left(\frac{q}{p}\right)_c$  sur le plan des contraintes ( $q, p'$ ). Le plan des contraintes est divisé en deux parties par cette ligne : un domaine de contraction sous-caractéristique et un domaine dilaté sur-caractéristique, comme le montre la figure 1.8. (Kenji Ishihara et al., 1975) ont également qualifié cette ligne de ligne de transformation de phase.

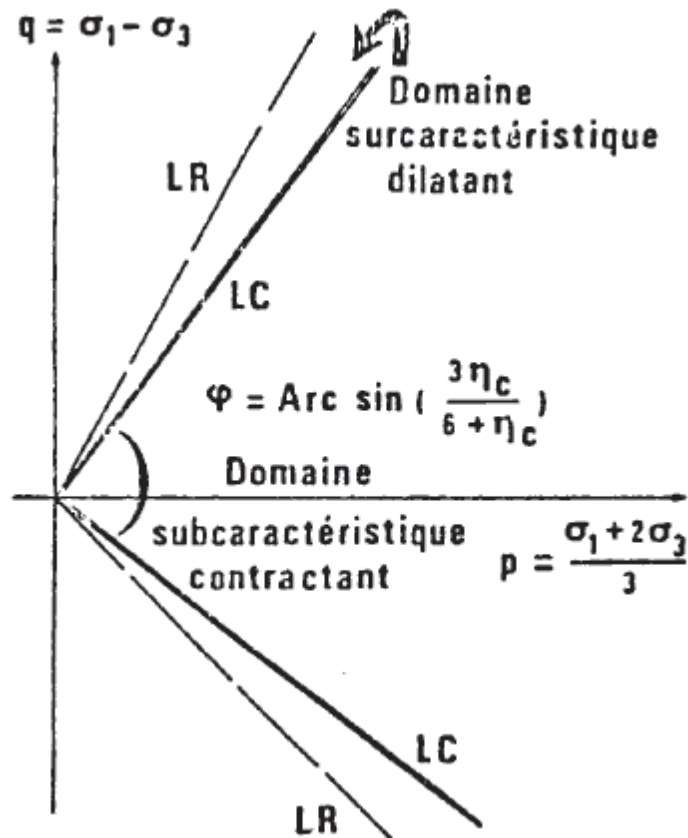


Figure 1. 8: Représentation des lignes caractéristiques dans le plan  $(q, p')$  (Luong, 1980)

## 1.4 Comportement des sables sous chargement monotone et cyclique

### 1.4.1 Comportement des sables sous chargement monotone

#### 1.4.1.1 Comportement drainé

Le comportement drainé caractérisé par un écoulement libre de l'eau interstitielle entre les particules d'un matériau sous l'effet d'une sollicitation. Le comportement drainé est donc caractérisé par des changements de volume du matériau et une pression interstitielle nulle.

Pendant la phase de contraction, le volume de l'échantillon de sable commence à diminuer au fur et à mesure que la valeur du déviateur ( $q$ ) augmente. C'est le résultat de l'enchevêtrement des grains de sable.

Le taux de déformation volumique du sable lâche se rapproche progressivement de zéro. Par contre, le taux de déformation volumique du sable dense est rapidement réduit à zéro et change de signe, ce qui entraîne une dilatation du matériau. La cause principale de cette phase de dilatation est le désenchevêtrement des grains de sable.

Lee (1965) a montré que la pression de confinement ( $\sigma'_c$ ) et la densité du sable influencent de

manière significative les phases de contractance et de dilatance. L'impact de ces deux paramètres sur le changement de volume est immédiatement évident. Les figures 1.9 et 1.10 montrent que lorsque la pression de confinement augmente, la phase de contraction diminue de façon continue pour ensuite prendre fin. L'analyse comparative des deux figures montre que, dans des conditions de confinement de même ampleur, une augmentation de la densité relative du sable entraîne une diminution de la phase de contractance et une augmentation de la phase de dilatance.

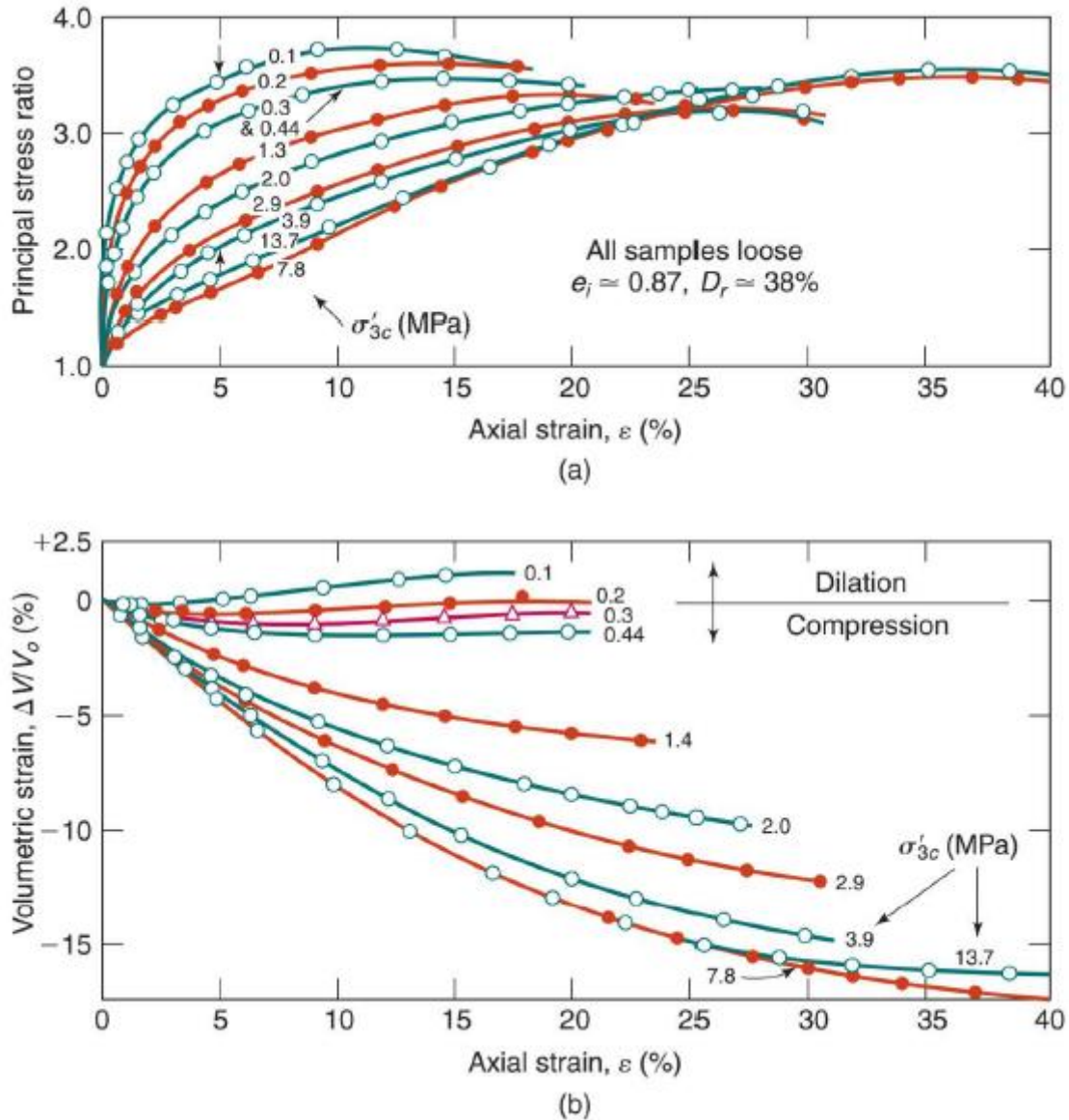


Figure 1. 9: Résultats d'essais triaxiaux drainés typiques sur du sable lâche de la rivière Sacramento: (a) rapport de contrainte principale en fonction de la déformation axiale ; (b) déformation volumique en fonction de la déformation axiale (d'après Lee, 1965).



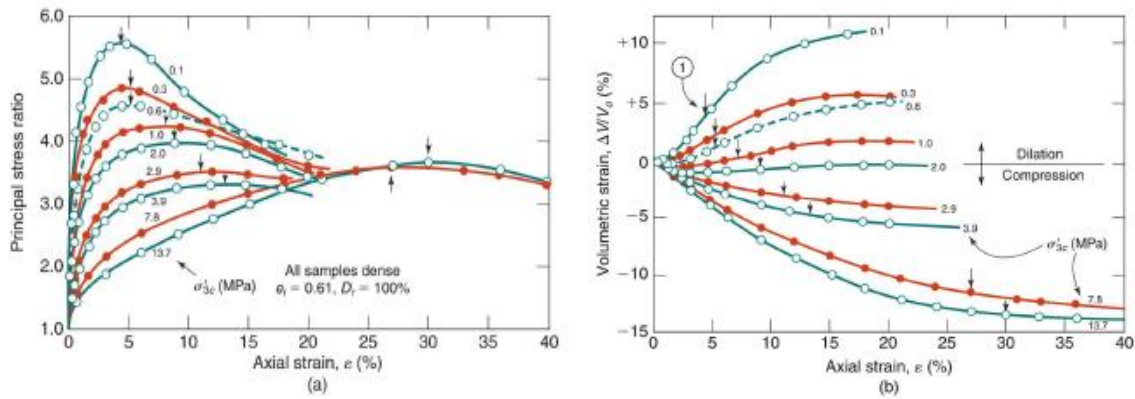


Figure 1. 10: Résultats d'essais triaxiaux drainés typiques sur du sable dense de la rivière Sacramento: (a) rapport de contrainte principale en fonction de la déformation axiale; (b) déformation volumétrique en fonction de la déformation axiale (d'après Lee, 1965).

#### 1.4.1.2 Comportement non drainée

Un comportement caractérisé comme non drainé dans un essai triaxial, correspond au blocage de la valve de l'eau interstitielle dans le matériau pendant le chargement, ce qui entraîne un changement de volume nul et une augmentation de la pression interstitielle de l'eau pendant la durée de l'essai. Lors d'un essai triaxial réalisé sous chargement monotone non drainée sur un échantillon de sable saturé, le volume du sable reste constant. Cependant, la pression interstitielle présente des changements au cours du test, permettant l'observation à la fois de la phase de contraction et de la phase de dilatation en fonction des changements de pression interstitielle.

La phase de contraction est caractérisée par une augmentation de la pression interstitielle, due à une évolution de la densité du volume solide. La phase de dilatation est caractérisée par une diminution de la pression interstitielle, résultant d'une tendance à l'augmentation du volume solide.

La figure 1.11 réalisée par Casagrande (1975) montre qu'au début du chargement, la pression interstitielle augmente pour les 3 essais non drainés (A), (B) et (C), ensuite le changement de la pression interstitielle s'annule pour les sables lâches (A), alors que pour les sables plus denses (B) et (C), une fois le taux de changement de la pression interstitielle annulé, on observe une diminution de la pression interstitielle. Pour l'essai (A), l'échantillon présentera une dégradation de la résistance au cisaillement, c'est-à-dire une liquéfaction. Dans les essais (B) et (C), en revanche, la diminution de la pression interstitielle permet à l'échantillon de reprendre sa résistance au cisaillement.

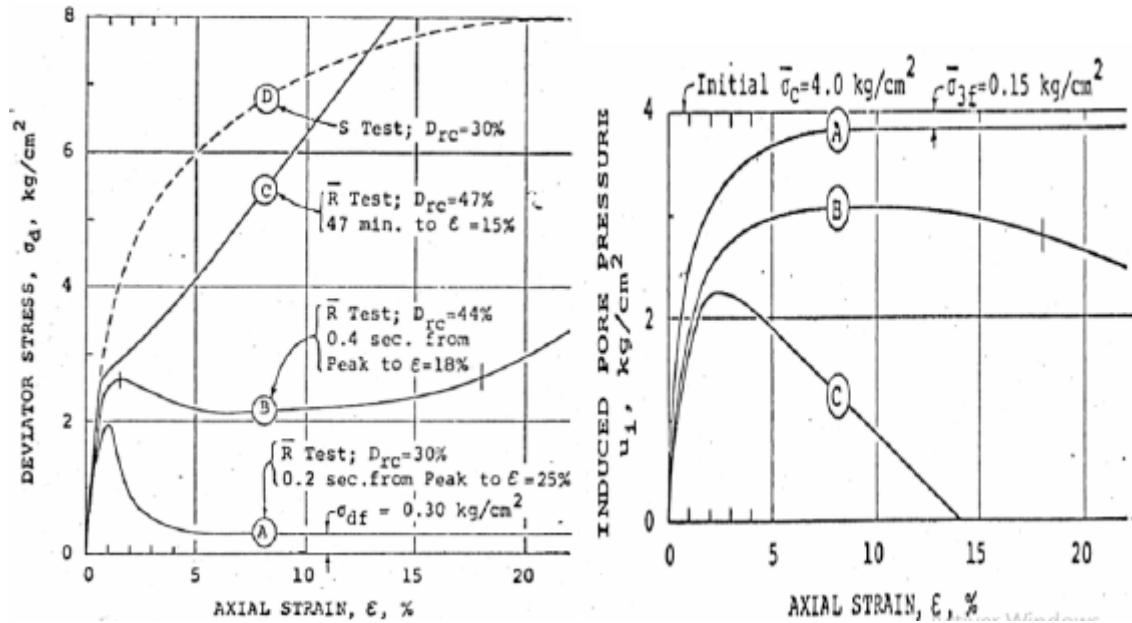


Figure 1. 11: Essais triaxiaux monotones non drainés (A,B,C) et drainé (D) sur sable d'après (Casagrande, 1975)

#### 1.4.2 Comportement des sables sous chargement cyclique

Le comportement cyclique du sable présente la réponse dynamique des sols sableux lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations cycliques ou à des conditions de chargement répétées. Ce comportement comprend la déformation et la reconstitution de grains à l'intérieur de la matrice de sable, ce qui entraîne des changements dans les propriétés mécaniques telles que la rigidité, la résistance et les caractéristiques de déformation au cours de cycles de chargement successifs. Sous une charge cyclique d'amplitude contrôlée (déformation ou contrainte), on observe trois types de phénomènes présentés dans la figure 1.12 :

- **Le rocher** : Déformation continue, entraînant des phénomènes de rupture tels que la liquéfaction ou la mobilité cyclique,
- **Accommodation** : ce processus stabilise le chemin de contrainte-déformation sur une boucle d'hystérésis,
- **L'adaptation** : une fois qu'un certain nombre de cycles a été enregistré, la courbe contrainte-déformation présente une évolution réversible, ce qui permet d'obtenir un comportement parfaitement élastique.

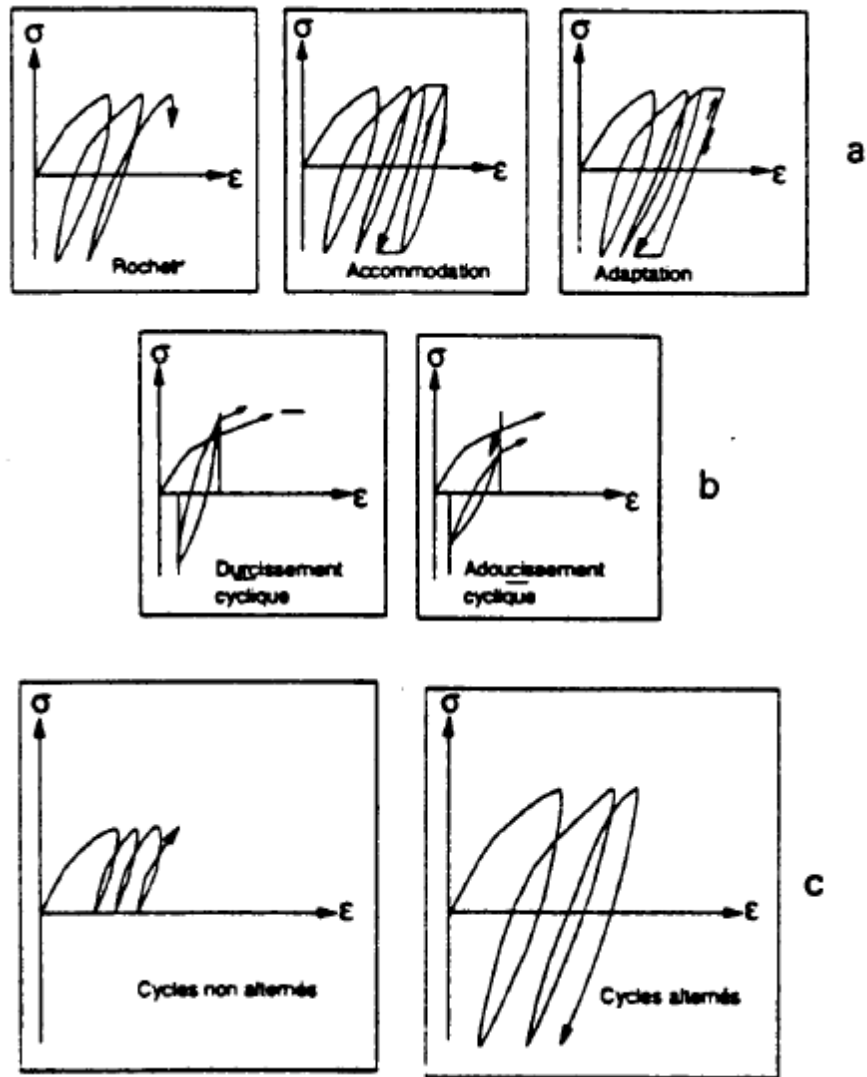


Figure 1. 12: Différents phénomènes cycliques observés (Bahda, 2010)

#### 1.4.2.1 Comportement cyclique drainée

L'accommodation ou le rocher est obtenu en fonction du comportement du sable s'il se contractant ou se dilatant selon (Luong, 1980), ses résultats sont illustrés dans la figure 1.13. L'accommodation est obtenue pour des charges se situant dans la zone sous-caractéristique. Ce comportement est caractérisé par une densification progressive après un nombre élevé de cycles, entraînant une stabilisation. Si l'amplitude des cycles est faible, le matériau prend un caractère plus dense jusqu'à l'obtention de l'accommodation. La roche est obtenue lorsque le matériau est soumis à des cycles de chargement de forte amplitude (au-delà de l'état caractéristique).

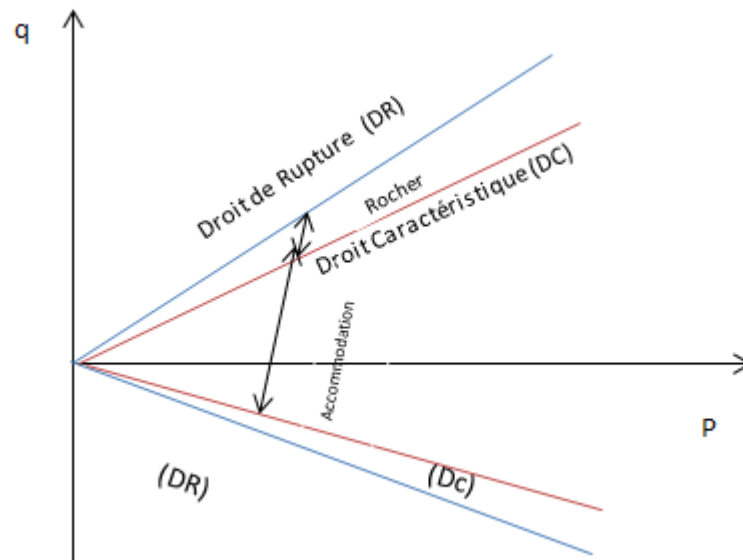


Figure 1. 13: Différents comportements cycliques drainés du sable

Tatsuoka et Ishihara ont réalisé en 1974 des essais triaxiaux cycliques drainés d'amplitude contrôlée. Ces essais montrent que les charges cycliques causent des déformations volumétriques qui entraînent une rupture du matériau caractérisée par une dilatation progressive. Les résultats de ces essais sont présentés à la figure 1.14, qui montre deux rapports de contrainte ( $\eta$ ) avec des amplitudes différentes: l'un avec une faible amplitude conduisant à la stabilisation (a) et l'autre avec une amplitude plus élevée conduisant à la rupture (b).

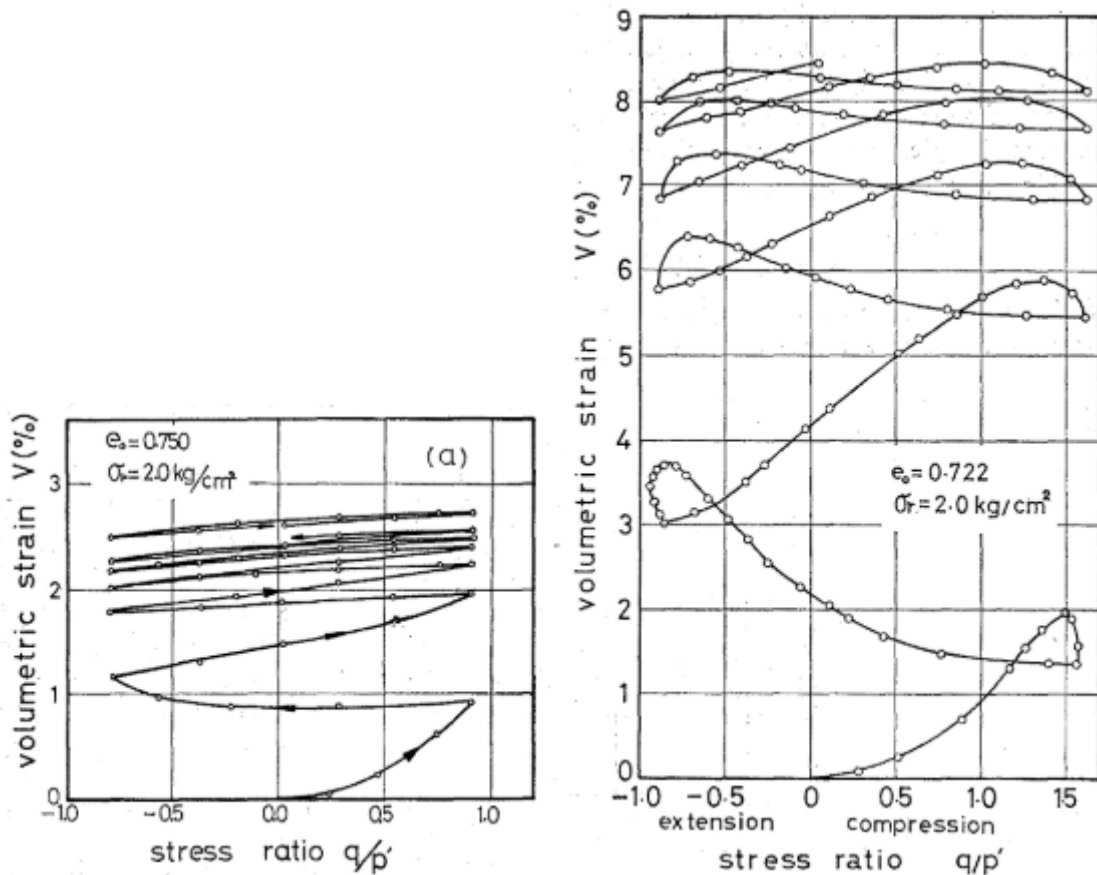


Figure 1. 14: Essais triaxiaux cycliques drainés à contrainte contrôlé (Tatsuoka et Ishihara, 1974)

#### 1.4.2.2 Comportement cyclique non drainée

Les effets de la contractance et de la dilatance se manifestent par des variations de la pression interstitielle, comme dans les essais de chargement monotone.

(Luong, 1980) a montré, à partir d'essais triaxiaux cycliques non drainés, que le comportement cyclique des sables était principalement influencé par la position des cycles par rapport à la ligne caractéristique (figure 1.15).

Dans la zone sub-caractéristique, des cycles de faible amplitude entraînent une augmentation de la pression interstitielle à chaque cycle et par conséquent une chute de la contrainte effective. Cette diminution s'arrête à la ligne caractéristique ; la dilatation entraîne une diminution de la pression interstitielle et une augmentation de la pression effective moyenne  $p'$ . Un état d'équilibre est donc établi à la ligne caractéristique et le comportement est alors appelé "mobilité cyclique". Dans la région sur-caractéristique, nous observons un autre phénomène. Le comportement dilatant réduit la pression interstitielle, ce qui fait que le chemin de la contrainte effective dans le plan  $(q, p')$  se déplace vers la ligne caractéristique, ce qui conduit à une stabilisation.

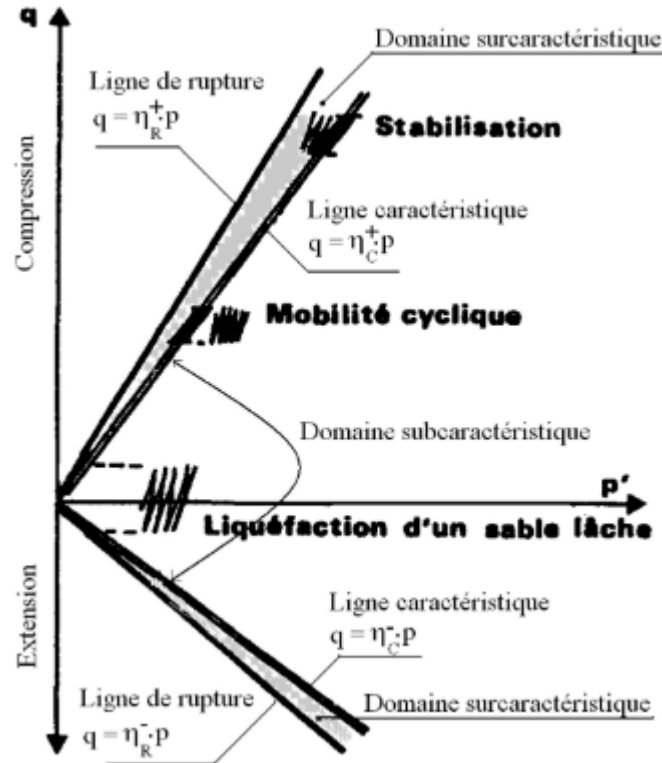


Figure 1. 15: Diagramme caractéristique du comportement en condition non drainés du sable  
(Bouafia, 2007)

## 1.5 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.

### 1.5.1 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  $\sigma'_h$  et  $\sigma'_v$  en vigueur à cette profondeur. Ces contraintes effectives s'appliquent aux faces verticales et horizontales respectivement.

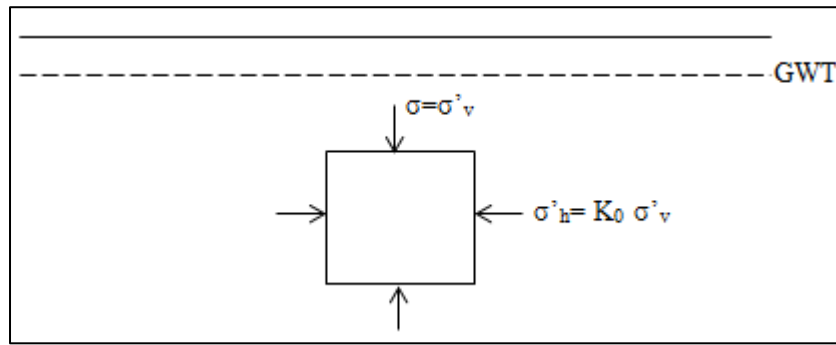


Figure 1. 16: Etat de contrainte initial d'un élément de sol au repos.

Ou;  $K_0$  = Coefficient des terres au repos.

$\sigma'_h$  = Contrainte effective horizontale.

$\sigma'_v$  = Contrainte effective verticale.

### 1.5.2 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 a 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.

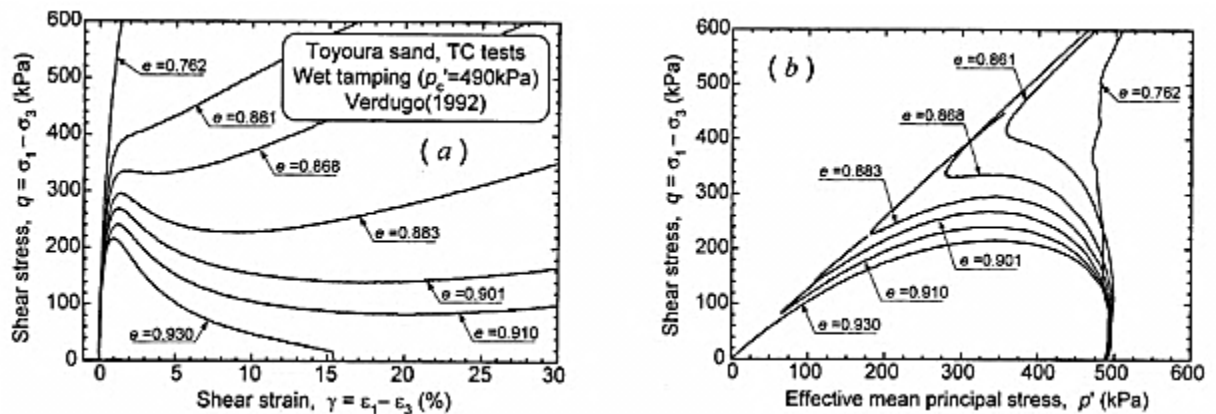


Figure 1. 17: Influence de l'indice des vides sur le comportement monotone non drainé du sable de Toyoura (Verdugo 1992)

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 1.18). Le même résultat a été obtenu dans les recherches menées par [Ladd et al. 1989](#).

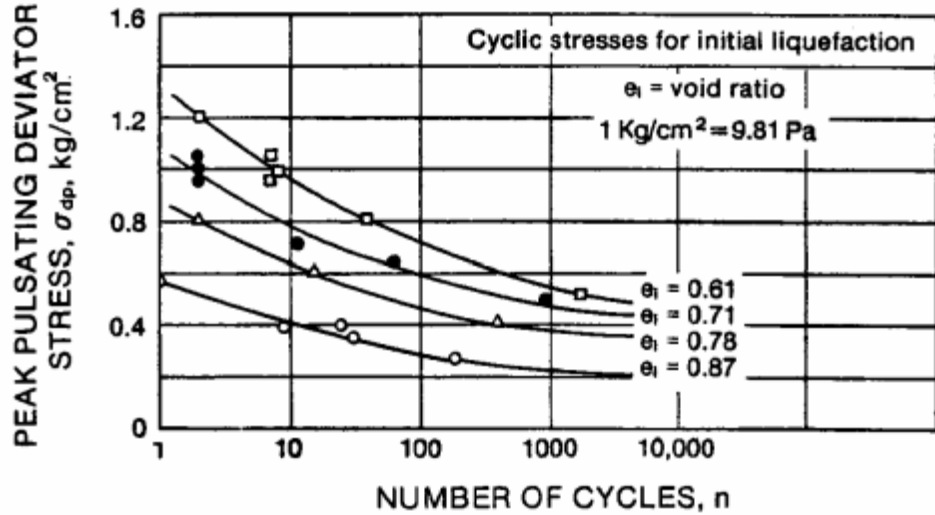


Figure 1. 18: L'effet de l'indice des vides sur la résistance au cisaillement cyclique ([Lee and Seed 1967](#))

[\(Ahmed Arab, 2009\)](#) 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 :  $I_D = 0,15, 0,50$  et  $0,65$ . Comme le montre la Figure 1.19, la résistance au cisaillement du sable augmente lorsque la densité relative augmente et que l'amplitude de chargement diminue.

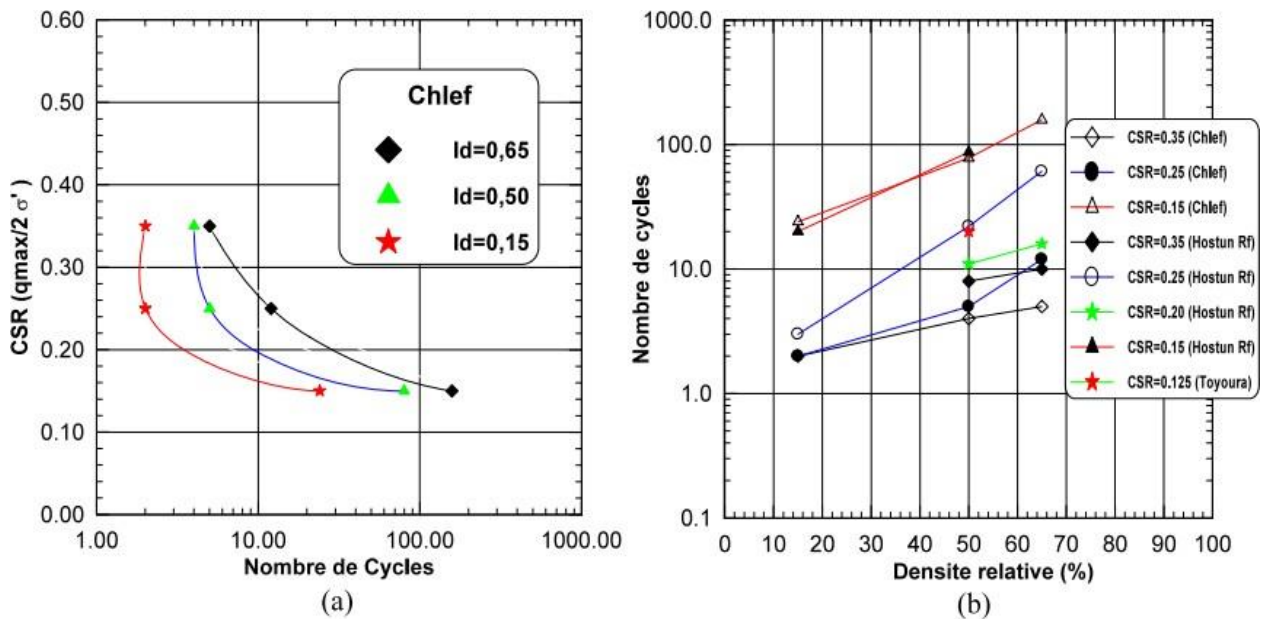


Figure 1. 19: Effet de la densité relative sur le potentiel de liquéfaction du sable de Chlef ([Ahmed Arab, 2009](#))



### 1.5.3 Présence de fines

L'étude des sols liquéfiés in situ a montré qu'ils sont principalement constitués de matériaux aluviaux, qui contiennent une quantité importante de fines. L'étude des sols liquéfiés in situ a révélé qu'ils sont principalement constitués de matériaux aluviaux, 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 cisillées, 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 1.20).

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.

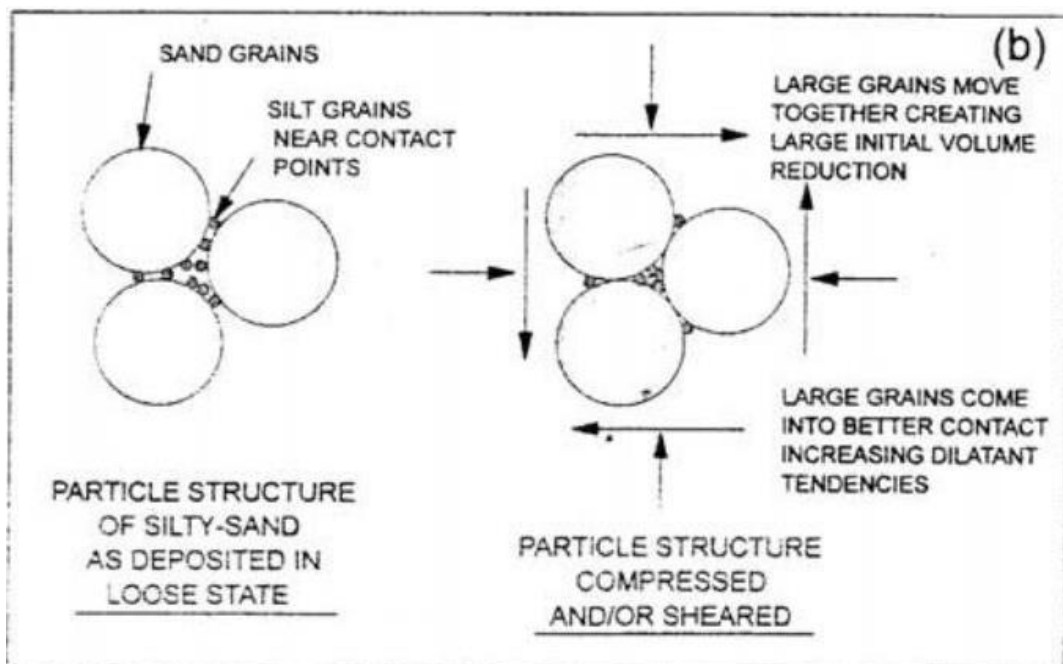


Figure 1. 20: Schématisation de la densification après le cisaillement de la structure d'après (Lade & Yamamuro, 1997).

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).

(Ahmed 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.

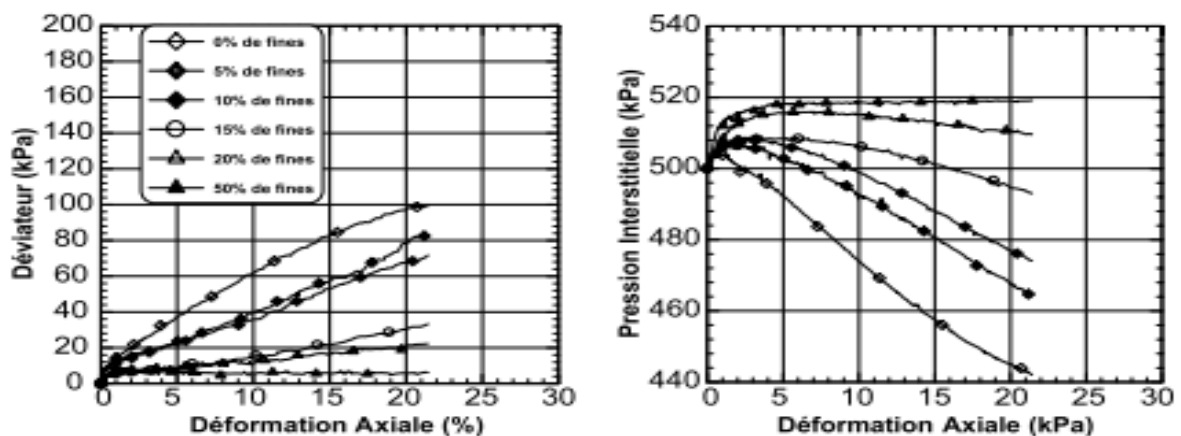


Figure 1. 21: L'influence de la teneur des fines sur le comportement non drainé d'un mélange sable-limon (Ahmed Arab, 2009)

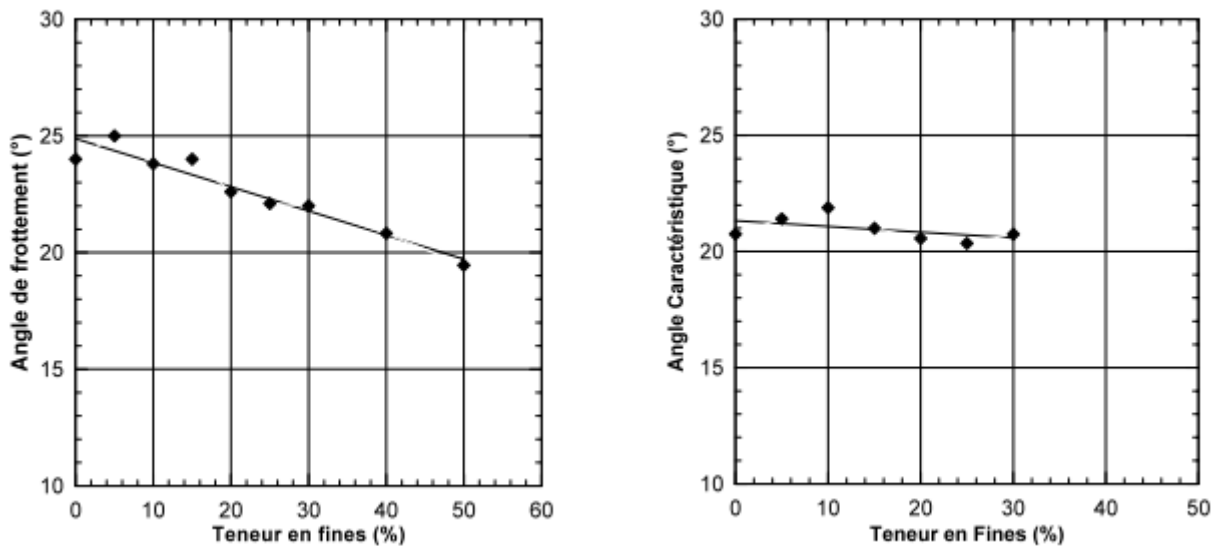


Figure 1. 22: Influence de la fraction des fines sur l'angle de frottement et l'angle caractéristique (Ahmed Arab, 2009)

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  $f_{\text{cthre}}=5\%$ . Ensuite, la résistance cyclique augmente avec l'augmentation des fines à faible plasticité (Figure 1.23). Cette tendance est conforme aux conclusions (Y.H.Ling, 1992 ;Belkhatir et al., 2010; Ingabire et al., 2019 ;Goudarzy et al., 2022).

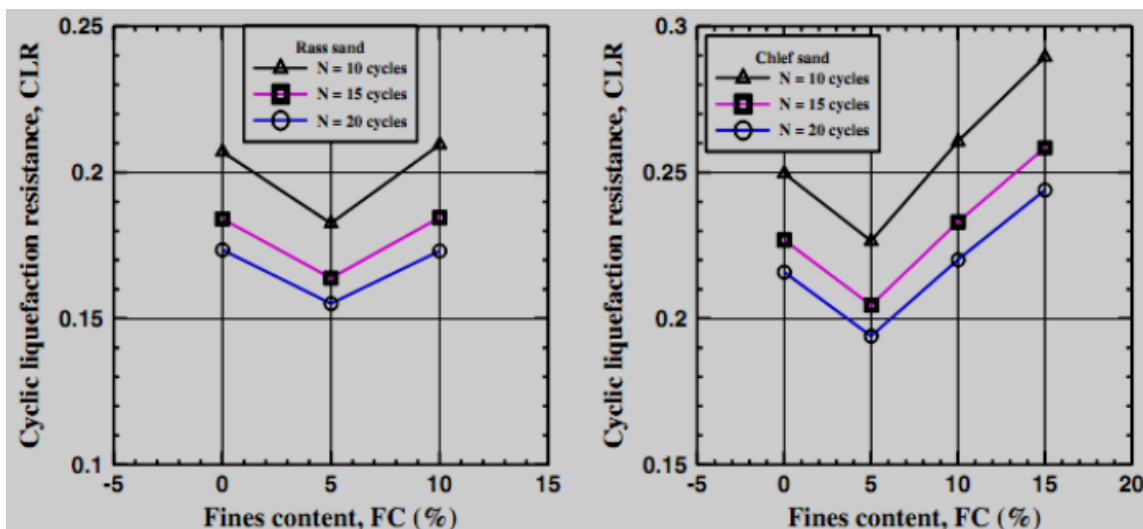


Figure 1. 23: Effet de fines peu plastiques sur la résistance à la liquéfaction cyclique (Benghalia et al., 2015).

### 1.5.4 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 1.24).

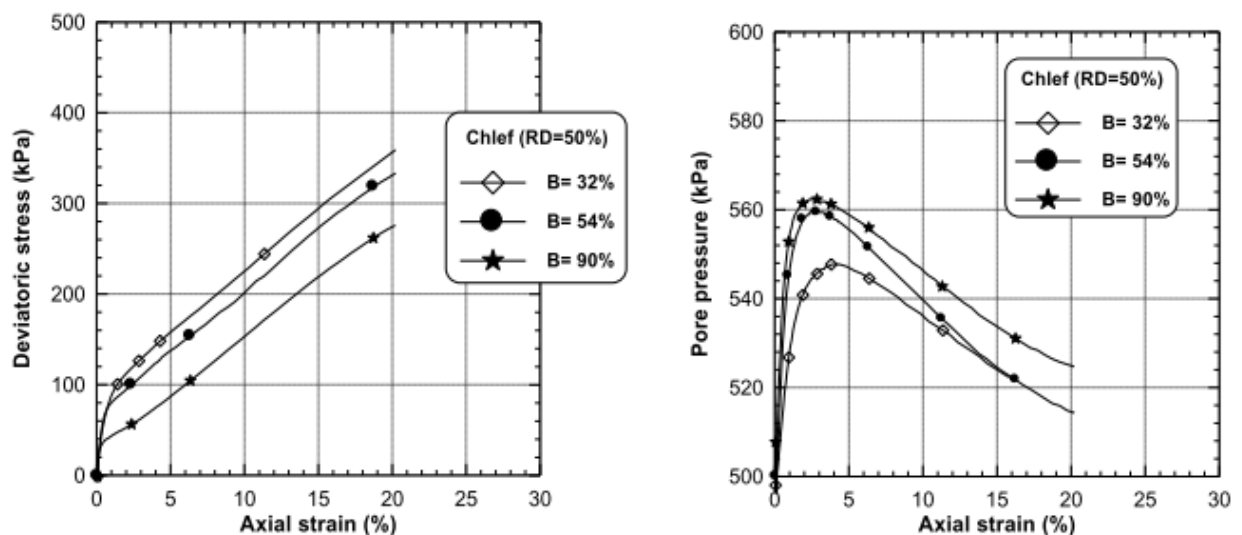


Figure 1. 24: Influence du coefficient de Skempton (B) sur le comportement non drainé du sable de Chlef (Della et al., 2010)

### 1.5.5 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 1.25).

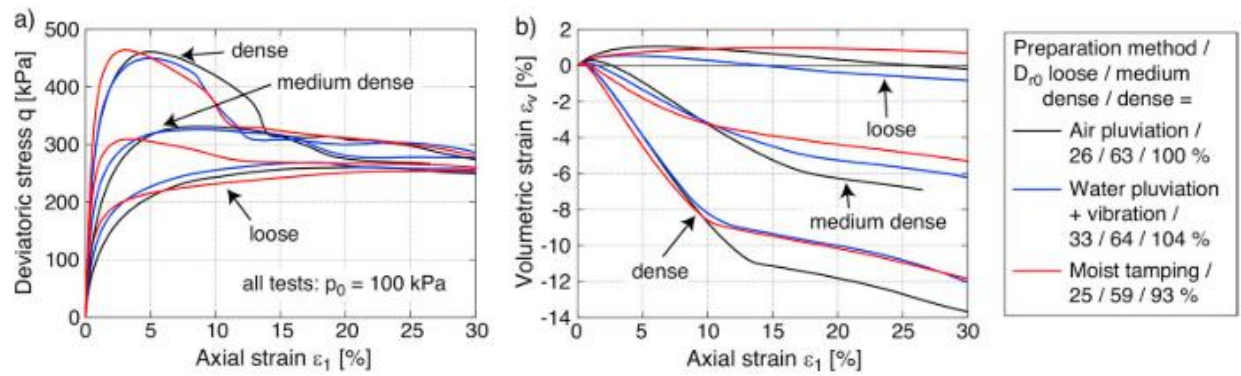


Figure 1. 25: Courbes a) de la contrainte déviatorique  $q(\varepsilon_1)$  et b) de la déformation volumétrique  $\varepsilon_v(\varepsilon_1)$  mesurées lors d'essais triaxiaux monotones drainés sur des échantillons lâche, moyennement denses et denses préparés par trois méthodes différentes (pluviation à l'air, pluviation à l'eau avec vibration ultérieure, damage humide en huit couches) (Wichtmann et al., 2020).

### 1.5.6 Le préchargement

Des recherches antérieures démontrent l'impact significatif de l'historique de la préchargement 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 préchargement, 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 de la préchargement sur le comportement conséquent des sols.

(Boufferra et al., 2007) effectuent une investigation expérimentale de la liquéfaction de sable d'Hostun sous l'effet d'une chargement cyclique non drainée, les résultats montrent qu'un préchargement 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 1.26 présente les résultats de deux séries d'essais réalisés par ( Arab et al., 2014) sur des spécimens de sols soumis à une contrainte de préchargement. Ils ont constaté que le préchargement augmente la résistance au cisaillement non drainé. pour la contrainte  $q_m = 60$  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.

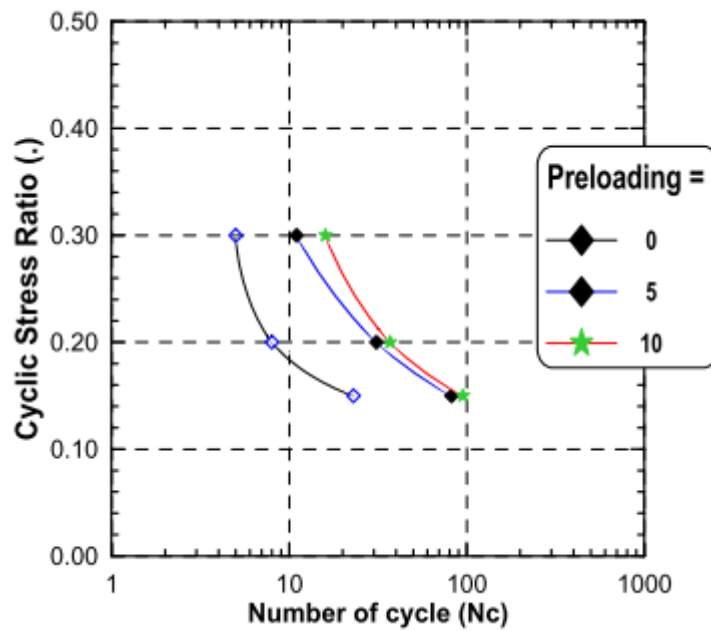


Figure 1. 26: Influence d'un préchargement cyclique sur résistance au cisaillement non drainé du mélange sable de Rass- limon SM ( $F_C 10\%$ ,  $I_D = 0,65$ ) (Arab et al., 2014)

## **1.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présentés la première partie de la synthèse bibliographique sur le comportement des sols granulaires sous chargement monotone et cyclique. Notre 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 se liquéfier. Divers facteurs affectant le potentiel de liquéfaction ont été rapportés dans la littérature, notamment la densité relative, la contrainte de confinement, la teneur en fines, le préchargement,....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 :**

### **Renforcement des sols sableux par des fibres et des méthodes de biocementation**

Le deuxième chapitre comporte une bibliographie sur le renforcement et le traitement des sols sableux par fibre et biopolymère



## 2.1 Introduction

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 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 2.1 présente différents schémas d'amélioration du sol, en particulier le traitement du site ou le renforcement du sol (Hejazi et al., 2012).

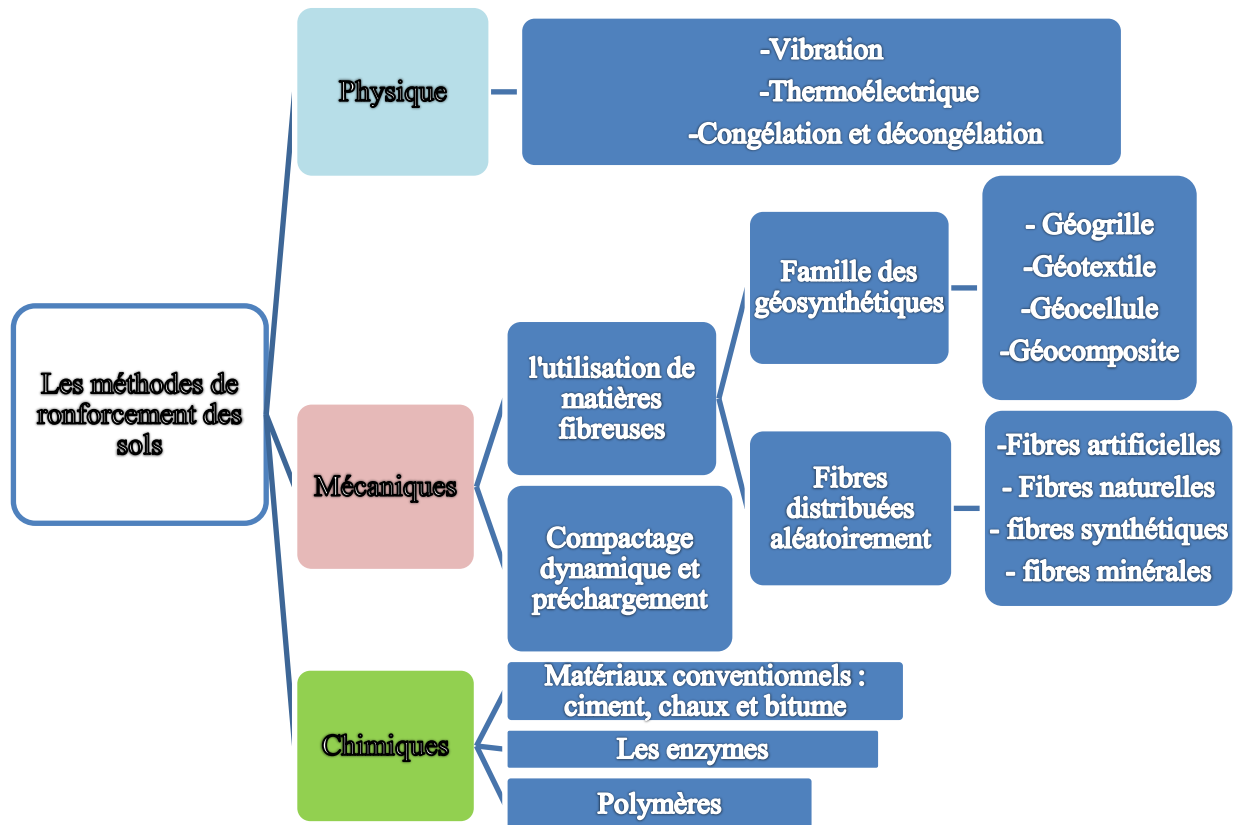


Figure 2. 1: Différentes méthodes de renforcement du sol

## 2.2 Renforcement des sols par l'utilisation des 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 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 2.2). 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 dépendent de la densité sèche du sable et de la teneur en fibre.



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

## 2.3 Différents type de fibres

### 2.3.1 Fibres artificiel 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 2.2, et chacun de ces types sera présenté ci-dessous.

#### 2.3.1.1 Polyacrylamide (PAM)

Le PAM [-CH<sub>2</sub>CHCONH<sub>2</sub>-] 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; Grumezescu 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).

#### 2.3.1.2 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 montré 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.

### **2.3.1.3 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.

### **2.3.1.4 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).

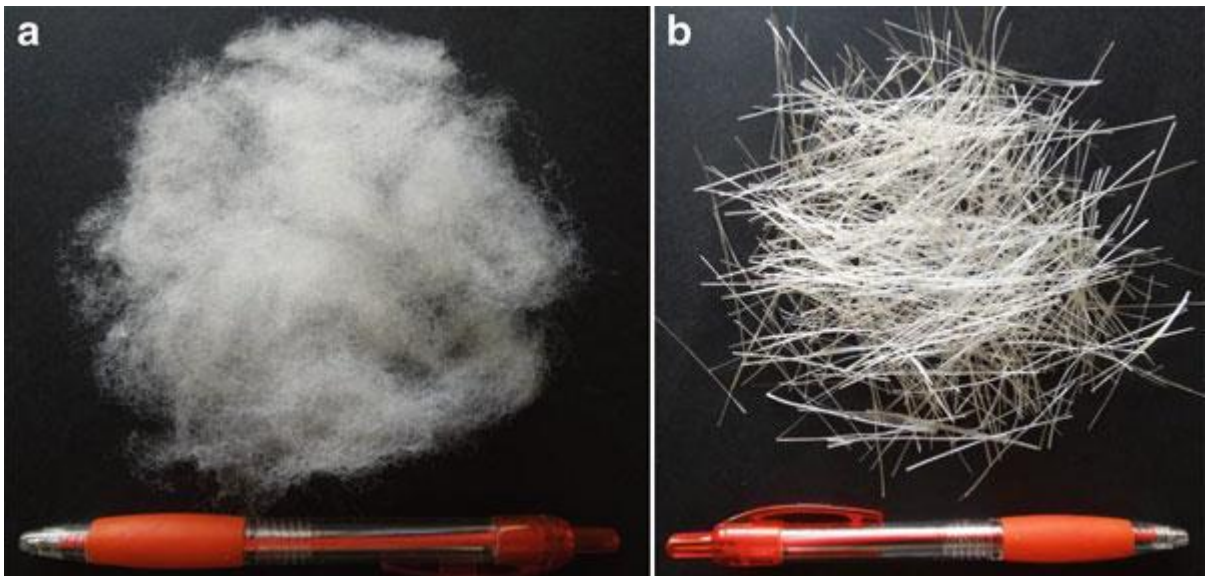


Figure 2. 3: Fibres synthétiques : (a) fibres de polypropylène (PP), (b) fibres de verre (Sanjay Kumar Shukla, 2017)

### 2.3.2 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 2.4 ;

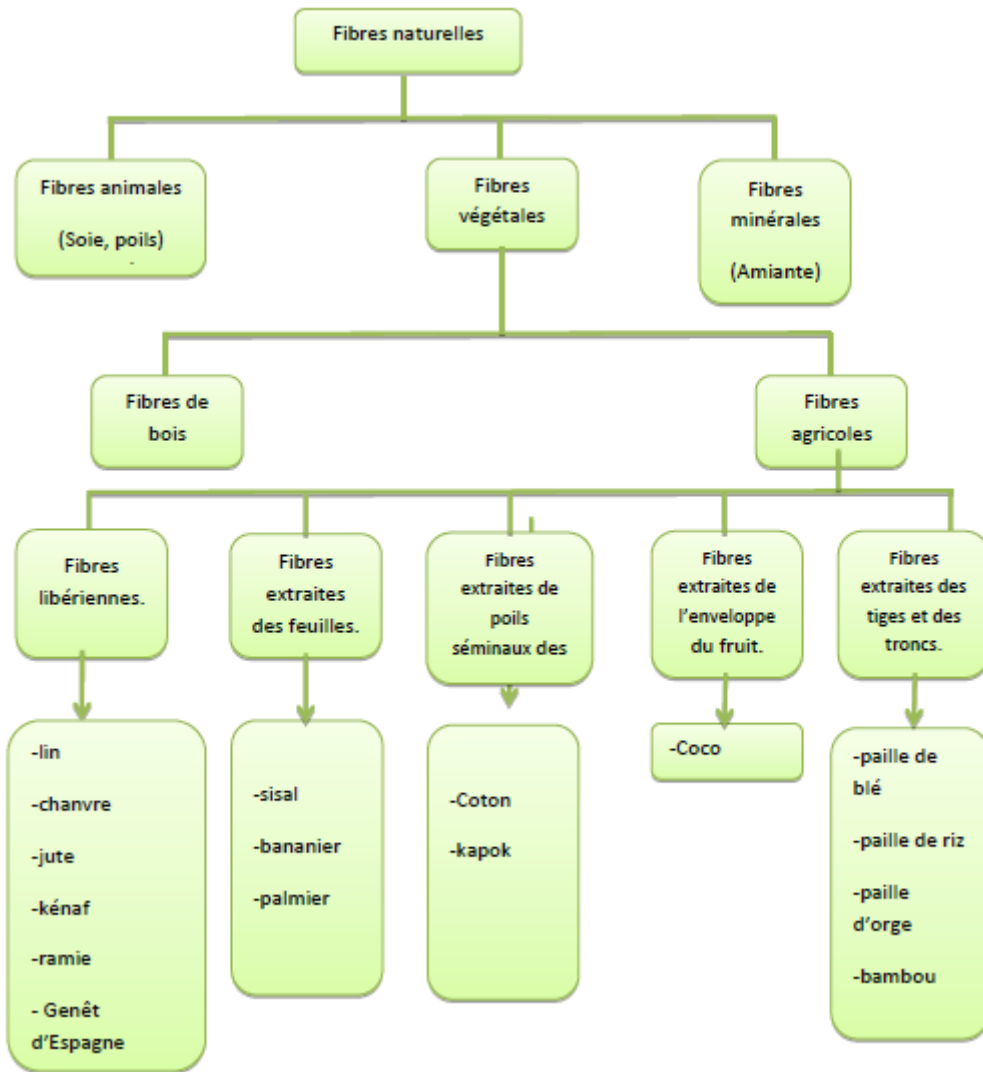


Figure 2. 4: Classification des fibres naturelles selon (Baley, 2004)

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 2.1 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. 1 : 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	(Singh et al., 2023)
Cotton	Résistance élevée à la traction, absorption	Filtration, système de drainage	(EsmailpourShirvani et al., 2019)
Coir	Durable, résistant à la dégradation microbologique	Stabilisation des pentes, contrôle des sédiments	(Syed and Guha Ray, 2021)



Figure 2. 5: Les fibres végétales (a) Fibre de sisal (Hao et al., 2023), (b) Fibre de Coir (Kaushik & Singh, 2021)



- Les fibres animales : Le deuxième type comprend les parties 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 2.6). 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. 6: Fibres de basalte (Zhang et al., 2023)

## 2.4 Paramètres influant sur 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.

### 2.4.1 L'effet des caractéristiques du sol

#### 2.4.1.1 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.

#### 2.4.1.2 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 2.7 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.

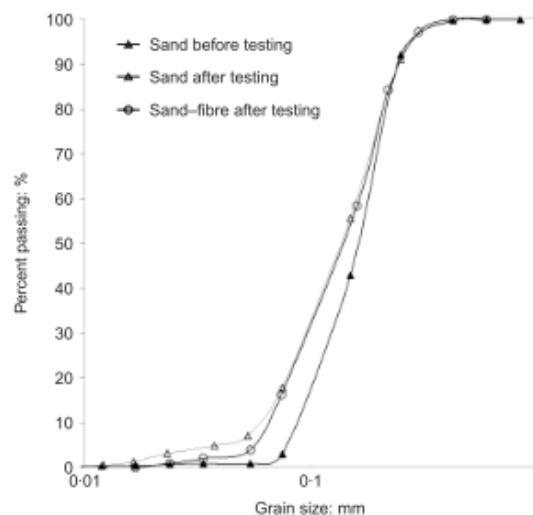


Figure 2. 7: Évolution de la granulométrie au cours de la compression isotrope à environ 50 MPa pour les échantillons de sable et de mélange fibres-sable (Dos Santos et al., 2010).

(Maher et Gray, 1990) il a été constaté que la résistance du sable renforcé augmente lorsque la taille moyenne des grains (D50) 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  $\varepsilon_a$  comme montre dans la figure 2.8, ils montrent 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.

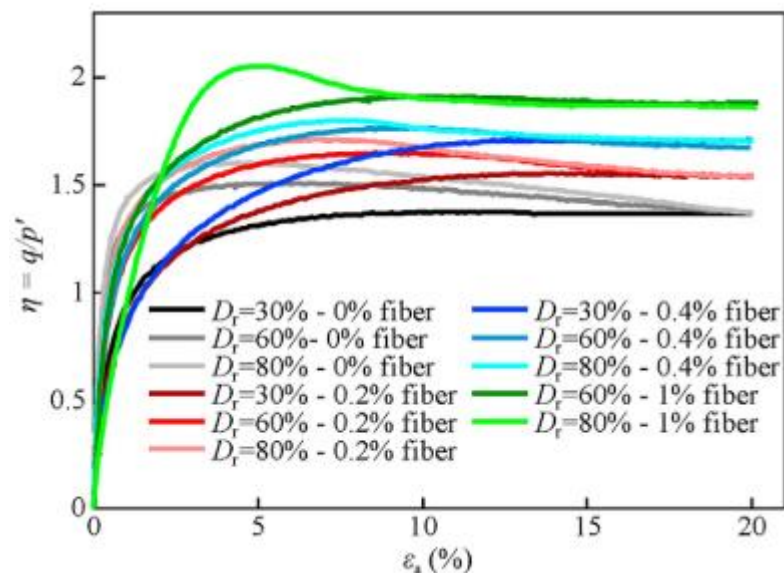


Figure 2. 8: Relation entre le rapport de contrainte et la déformation axiale pour toutes les teneurs en fibres et différentes densités relatives initiales. (Ganiev et al., 2022)

## 2.4.2 L'effet des propriétés des fibres

### 2.4.2.1 L'effet de type des fibres

La figure 2.9 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 structurels, 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. 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)

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 2.10) (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 2.11) . 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.

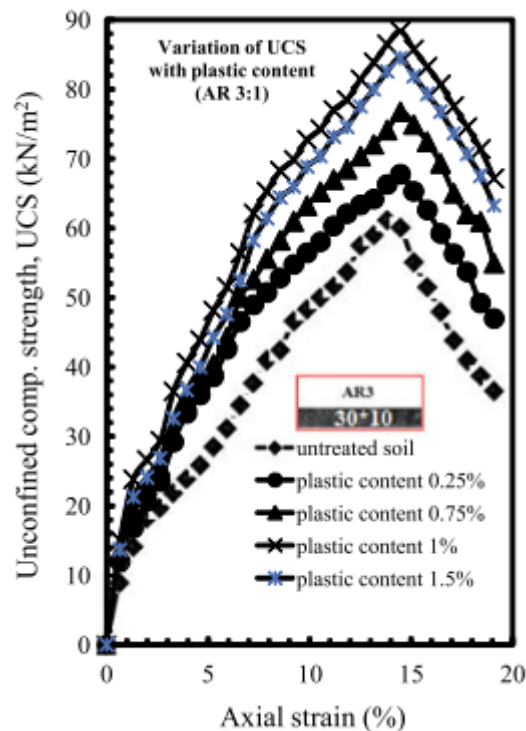


Figure 2. 10: Variation de la résistance à la compression non confinée en fonction de la teneur en matière plastique (Mir, 2020)

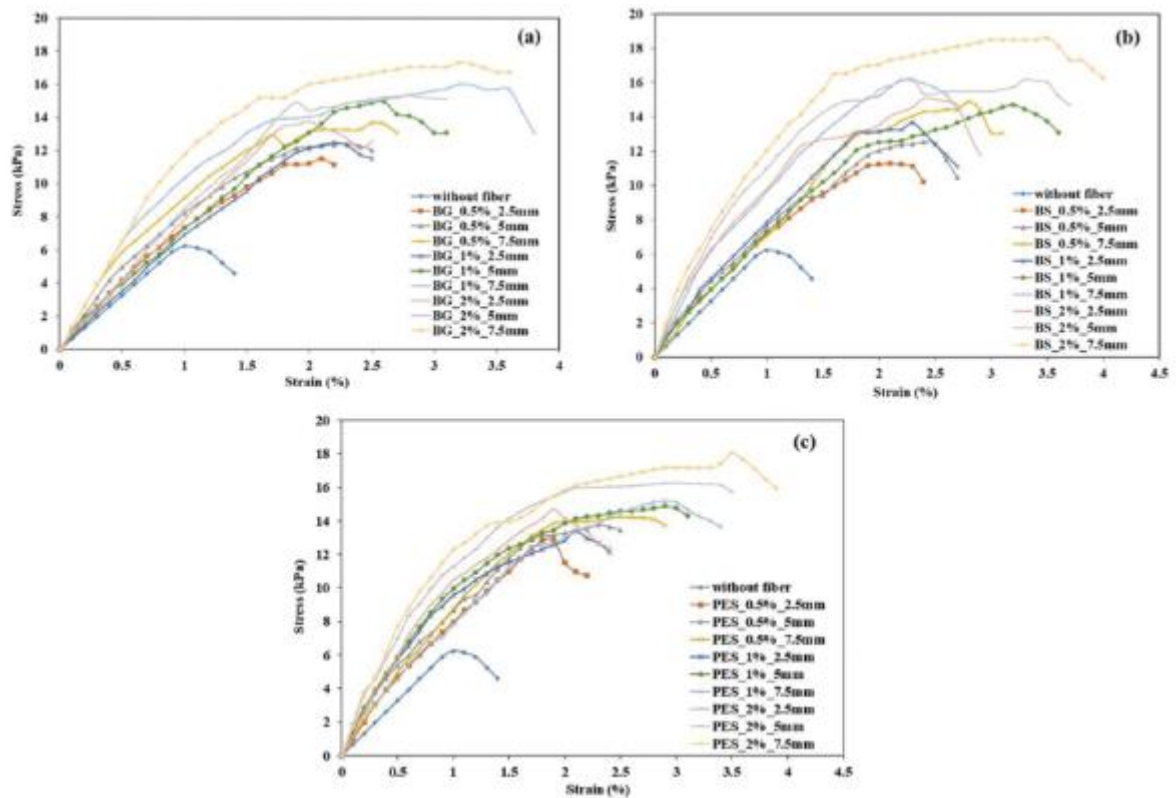


Figure 2. 11: Courbes contrainte-déformation : (a) Fibre de bagasse (b) Fibre de basalte (c) Fibre de polyester.(Ghasemi Nezhad & Tabarsa, 2023)

#### 2.4.2.2 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 2.12 (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 à été changé 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 2.12b).

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.



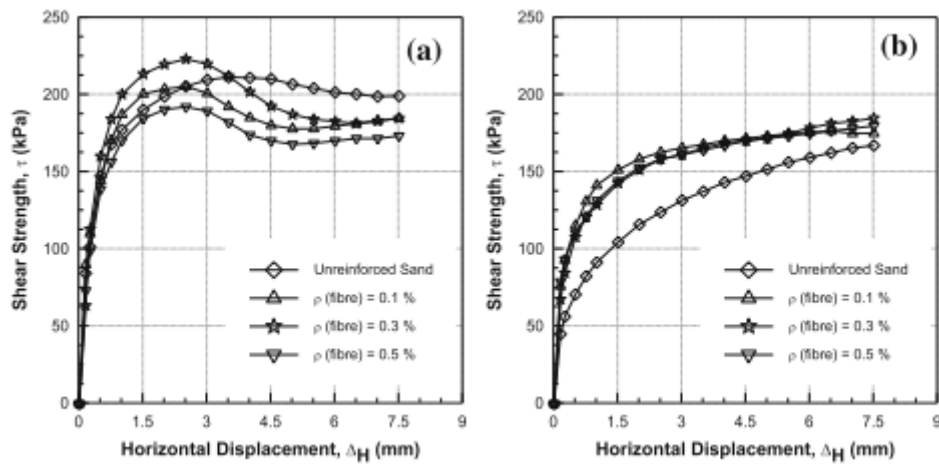


Figure 2. 12: Effet sur les fibres de la résistance au cisaillement d'une pression de confinement de 200 KPa et d'une densité relative élevée  $D_r = 87\%$ : (a) variation de la résistance au cisaillement en fonction de la forme de déformation horizontal du sable sec, (b) variation de la résistance au cisaillement en fonction de déformation horizontale avec une teneur en eau de l'échantillon  $w = 3\%$ . (Benessalah et al., 2016)

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 2.13 (a). D'autre part, la figure 2.13 (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.

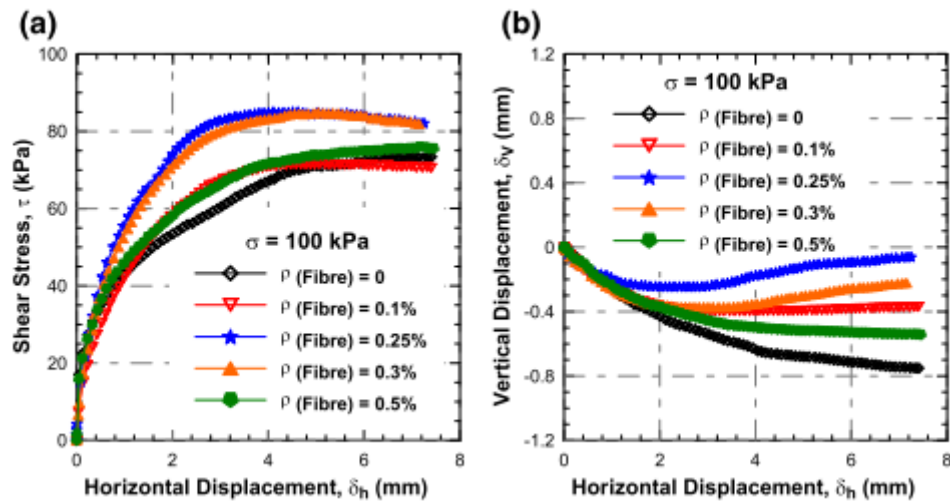


Figure 2. 13: Résistance au cisaillement du sable propre renforcé sous une contrainte de confinement de 100 KPa ( $W = 3\%$ ), (a) contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal, (b) déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal (Aouali et al., 2019).

(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 entraîne une augmentation de cohésion et une légère augmentation de l'angle de frottement interne (Figure 2.14), ce comportement peut s'expliquer par le fait que les microfibrilles 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.

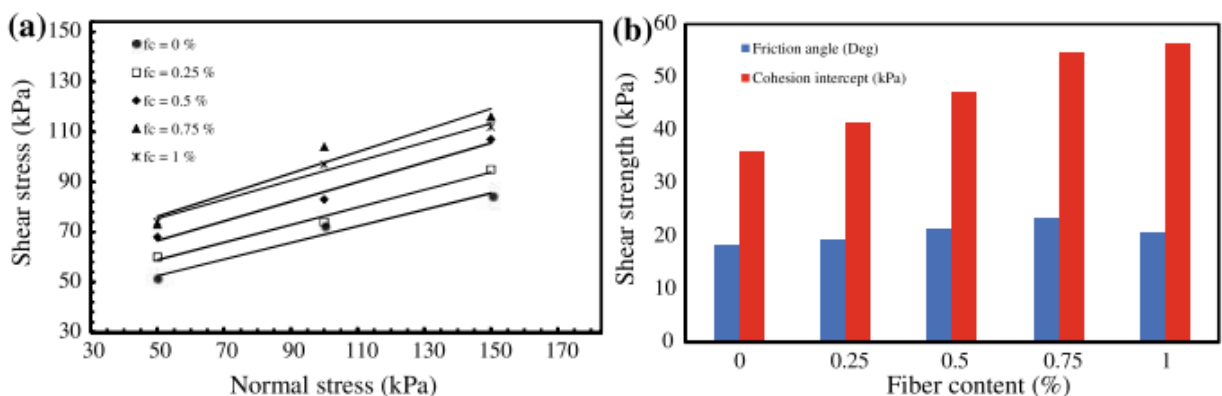


Figure 2. 14: L'effet de teneur en fibre de carbone sur la résistance au cisaillement (Gul et al., 2023)



(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.

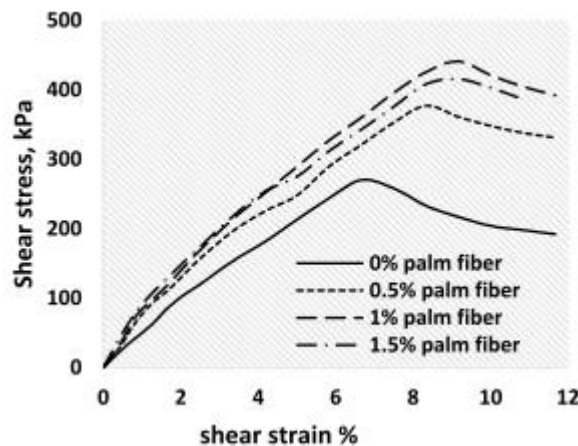


Figure 2. 15: Relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation de cisaillement à différentes teneurs en fibres (Alhassani, 2021)

(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.

#### 2.4.2.3 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) à étudier l'effet et la contribution des fibres avec des essais triaxiaux de type CD. La figure 2.16 montre la relation entre le rapport de contrainte ( $\eta$ ) et la déformation axiale ( $\epsilon_a$ ). 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%).

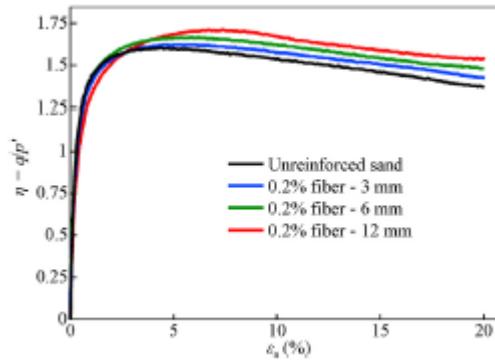


Figure 2. 16: Influence de la longueur des fibres sur le rapport de contrainte (paramètre de la ligne d'état critique).(Ganiev et al., 2022)

(Yazici & Keskin, 2024) a 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 2.17 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.

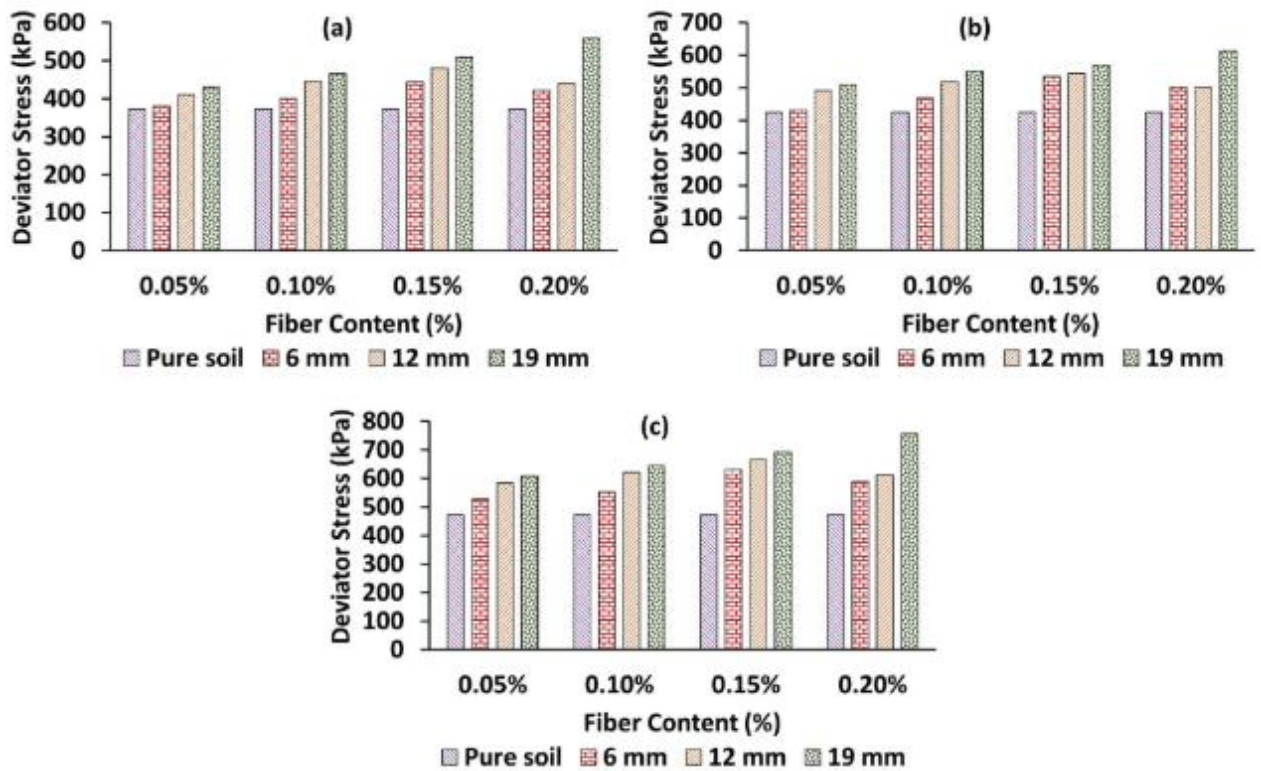


Figure 2. 17: Effet de la longueur des fibres sur la contrainte déviatorique pour a 50 KPa, b 100 KPa, et c 200 KPa. (Yazici & Keskin, 2024)

#### 2.4.2.4 Application 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 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 2.18 ci-dessous montre les applications possibles des sols renforcés par des fibres (murs de soutènement, semelles, barrages, etc.).

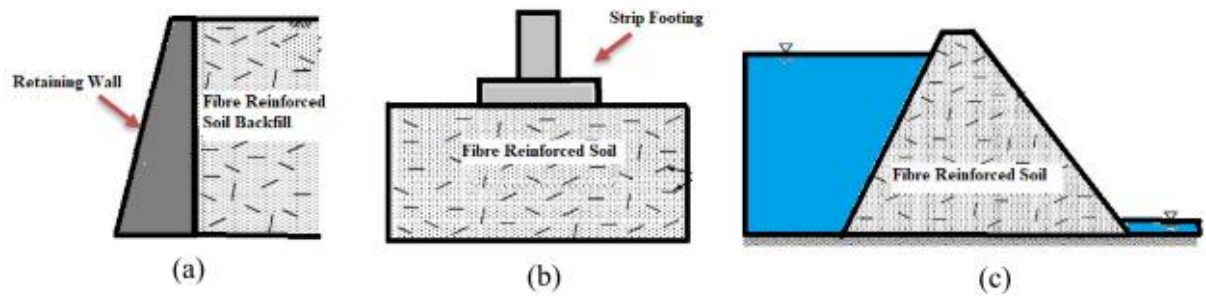


Figure 2. 18: Applications du sol renforcé par des fibres : (a) un mur de soutènement, (b) une semelle isolé, (c) un barrage de type « digue » (petit barrage construit en travers d'un bassin de rétention, d'une rigole ou d'un canal pour réduire la vitesse de l'écoulement).(Safdar et al., 2022)

## 2.5 Traitement des sols par l'utilisation des biopolymères

Les sols sableux, caractérisés par leur texture à gros grains et leur faible cohésion, posent souvent des problèmes importants en matière d'ingénierie géotechnique. Leur instabilité peut entraîner des problèmes tels que l'érosion, une forte compressibilité et une faible capacité portante. Les méthodes traditionnelles de stabilisation des sols, telles que l'utilisation de ciment ou de chaux, bien qu'efficaces, présentent des inconvénients environnementaux et peuvent être coûteuses. Ces dernières années, l'utilisation de biopolymères comme méthode alternative de stabilisation des sols sableux a connu un intérêt croissant. Les biopolymères, dérivés de sources naturelles, offrent une approche durable et écologique de la stabilisation des sols.

L'objectif général du traitement des sols dans l'ingénierie de la construction est d'améliorer les propriétés du sol telles que la stabilité des agrégats, la solidité et la résistance à l'érosion. Les matériaux conventionnels de traitement des sols présentent plusieurs défauts, en particulier du point de vue de l'environnement (Chang et al., 2015a). C'est pourquoi il est nécessaire de trouver un substitut écologique aux matériaux conventionnels.

Les techniques chimiques et les méthodes biologiques couramment utilisées consistent à améliorer les sols à l'aide d'additifs chimiques et de processus biologiques.(Arul et al., 2016; Gu & Chen, 2022)

Il existe plusieurs catégories distinctes de biopolymères, notamment la possibilité de biodégradation (biodégradable et non biodégradable) et la source des matières premières. (Niaounakis, 2015) fait une classification des biopolymères en fonction de leur origine biologique, qui peut être résumée comme étant d'origine végétale, animale ou microbienne.

Tableau 2. 2 : leur origineClassification des Biopolymères se (Niaounakis, 2015)

Biopolymères d'origine végétale	Biopolymères à base de micro-organismes	Biopolymères d'origine animale
Guar	Xanthane	Chitosane
Agar	Dextrane	Caséine
Lignine	E-polylysine	
Bêta-glucane	Gellane	
Alginate		
Carraghénanes		

Les biopolymères dérivés des plantes et des dérivés des produits agricoles sont désignés par le terme « à base de plantes ». Dans le domaine de la géotechnique, les biopolymères sont le plus souvent des composés d'origine végétale, dont la majorité sont des polysaccharides. Cette catégorie comprend, en plus de l'alginate et de la lignine, le carragénane, le guar, la lignine, l'agar et le bêta-glucane. La plante de guar produit de la gomme de guar, également connue sous le nom de guaran, un polysaccharide. Les deux sucres galactose et mannose se combinent pour la former. (Kumar et al., 2024)

Les biopolymères à base de micro-organismes comprennent la gomme xanthane, la gomme gellane et le dextrane, qui sont tous des sous-produits de processus de fermentation bactérienne.

La bactérie appelée *Xanthomonas campestris* fermente le glucose et le saccharose pour créer la gomme xanthane, un polymère anionique. La pseudo-plasticité et la forte stabilité au cisaillement, même à faible concentration, sont les propriétés les plus connues de la gomme Xanthane. Elle est également compatible avec les sels ioniques et a une longue durée de conservation sans modification du pH. La xanthane est utilisée comme gélifiant, épaississant, stabilisateur, floculant et agent de contrôle de la viscosité dans une grande variété d'industries, notamment dans les secteurs des cosmétiques, de l'huile, du papier, de la peinture, des produits pharmaceutiques, de l'alimentation et du textile (García-Ochoa et al., 2000).

Les biopolymères d'origine animale se trouvent dans le milieu animal. Le lait et les autres produits laitiers sont transformés en biopolymères à base de protéines, les résidus de coquille de poisson sont transformés en chitine et en chitosane (D. W. Lee et al., 2013).

## 2.5.1 Biopolymères les plus utilisés dans l'ingénierie géotechnique

### 2.5.1.1 La gomme de xanthane

La bactérie *Xanthomonas campestris* permet de produire la gomme xanthane, un polysaccharide anionique, par fermentation aérobie du sucre. La figure 2.19 illustre la structure chimique de ce biopolymère. Lorsqu'elle est mélangée à de l'eau, la gomme xanthane forme un hydrogel très visqueux, qui donne à la solution une consistance épaisse lorsqu'on lui applique un mouvement d'agitation. En raison de sa capacité à absorber l'eau par liaison hydrogène, la gomme xanthane est couramment utilisée comme une matière de renforcement. Elle améliore la capacité de rétention d'eau, réduit la perméabilité des sols sableux et améliore la résistance à l'érosion dans le domaine de l'ingénierie géotechnique (Kumar et al., 2024).

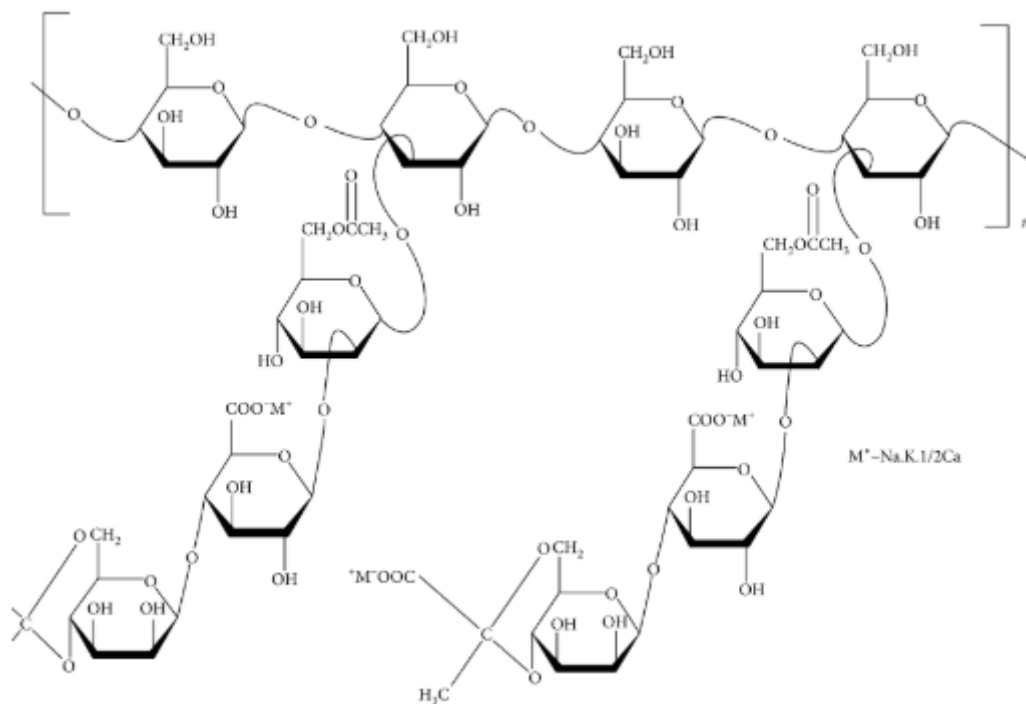


Figure 2. 19: la structure chimique de la gomme de xanthane (Sivadasan & Sachan, 2016)

(A. et al., 2024) à montrer que l'augmentation de la limite d'élasticité des biopolymères a entraîné une augmentation de la cohésion effective ( $c'$ ) du matériau traité, tandis que les sols traités avec tous les biopolymères ont entraîné une diminution de l'angle de frottement effectif du sol ( $\phi'$ ).

En plus d'être facile à obtenir, facile à traiter et économique, la gomme xanthane est principalement utilisée dans l'ingénierie géotechnique pour améliorer la résistance du sol et les propriétés de rétention d'eau (Seo et al., 2021).



Les résultats des essais menés par (Bagheri et al., 2023), présentés dans la figure 2.20, indiquent que le traitement à la gomme xanthane est efficace pour assurer le bon comportement du sol et améliorer sa capacité de rétention de l'eau. Le sol non traité s'est désagrégé rapidement lorsqu'il a été immergé dans l'eau, contrairement aux spécimens traités à la gomme xanthane qui ont conservé leur forme générale et n'ont subi qu'une légère dégradation après quelques jours. L'échantillon traité à la gomme xanthane à 2 % a montré la plus grande stabilité, même après cinq jours d'immersion, avec une augmentation significative de son diamètre. Cela montre que la gomme xanthane peut être un additif précieux pour améliorer la stabilité des sols et leur capacité à résister à l'eau.

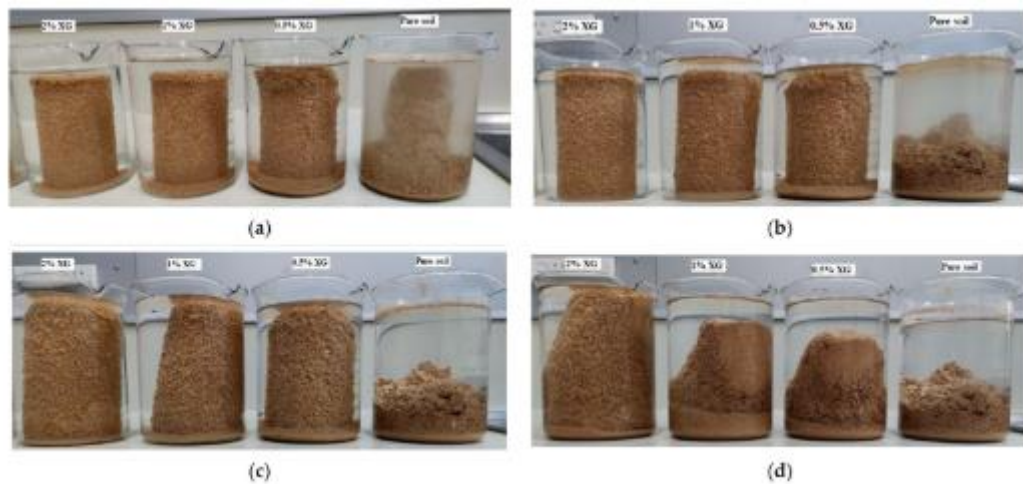


Figure 2. 20: Spécimen de gomme xanthane immergé dans l'eau par (Bagheri et al., 2023) à a 1 h b 4 h c 1 jour d 5 jours.

(Bagheri et al., 2023) a effectué une série de tests UCS pour les pourcentages donnés de sol traité au XG. La figure 2.21 montre les valeurs de la UCS pour le sol traité au XG en fonction du temps de durcissement.

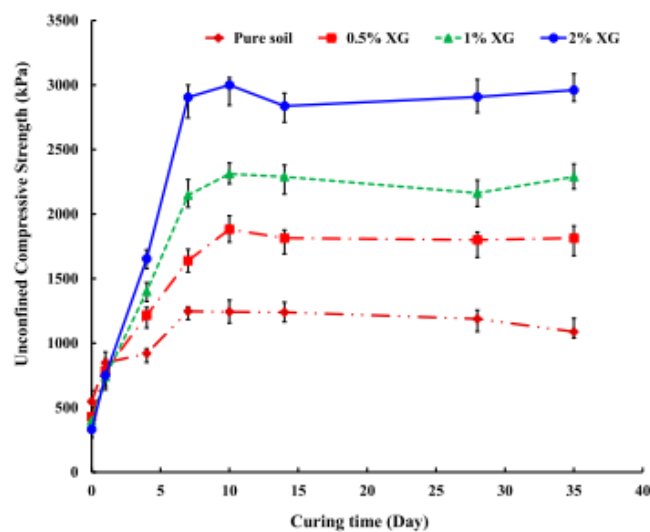


Figure 2. 21: Variation de l'UCS pour le sol traité au XG en fonction du temps de

cure (Bagheri et al., 2023)

Pour tous les échantillons traités au XG, la résistance à la compression du sol a augmenté de manière significative avec l'augmentation du temps de durcissement, en particulier après 7 jours de durcissement. Les échantillons traités au XG ont atteint leurs valeurs maximales de résistance du sol après 10 jours, alors que le sol non traité a atteint sa résistance maximale après 7 jours de durcissement. La résistance à la compression du sol a augmenté avec la teneur en XG. Après 10 jours de durcissement, l'échantillon traité à 2 % de XG présente une valeur de UCS presque 3 fois plus élevée que l'échantillon non traité. Cette augmentation est attribuée à la liaison du sol avec l'additif XG.

(M. Lee et al., 2021) étudier le comportement de cisaillement inter-facial du sable traité aux biopolymères par rapport aux interfaces solides ainsi que le cisaillement interne sur la matrice biopolymère-sol a été exploré par des tests de cisaillement direct et d'interface. Les résultats expérimentaux montrent un effet prédominant de la teneur en eau du sol sur le comportement de cisaillement interfacial du sol traité aux biopolymères, ce qui s'explique par la transition rhéologique des hydrogels de biopolymères. La figure 2.22 a,b montre le comportement en cisaillement du sable traité à la gomme xanthane (1%) sous des pressions de confinement verticales de 50, 100, 200 et 400 KPa. Dans tous les cas, la contrainte de cisaillement direct et la déformation verticale varient en fonction de la contrainte normale. Lorsque la contrainte normale augmente, la contrainte de cisaillement direct augmente également (figure 2.22 a), en même temps le sol devient moins dilatant (figure 2.22 b) en raison de la solidification de la liaison entre les grains de sable. La figure 2.22 c,d présente le comportement au cisaillement dans trois différents états dans lesquels le sable traité à la gomme xanthane est humide (c.-à-d. initial, séché et resubmergé). L'hydrogel de gomme xanthane existant dans les pores du sable a montré des tendances différentes de son efficacité en fonction de la teneur en eau. Un changement de phase dans la solution de gomme xanthane d'un hydrogel (état initial) au film de gomme xanthane s'est produit avec la déshydratation (séché), ce qui a généré des résistances à la traction. Ainsi, un pic évident de la résistance au cisaillement existe avant la rupture, suivi d'une résistance résiduelle avec plus de dilatation par rapport aux autres échantillons ayant une présence d'eau. De plus, la condensation du film de gomme xanthane est perturbée et atteint un état de gonflement lorsqu'elle est en contact avec de l'eau (resubmergée) et présente un comportement plus contractant que celui de l'hydrogel uniforme à l'état initial. La figure 2.22 e,f révèle que la contrainte de cisaillement direct du sable traité à la gomme xanthane augmente avec le  $M_{XG}/M_S$  à l'état sec. Par rapport au sable pur, le sable traité à la gomme xanthane présente un effet de renforcement et de dilatation important à l'état



séché, et cet effet est plus important à des conditions  $M_{XG}/M_S$  plus élevées, ce qui augmente l'épaisseur des films de gomme xanthane à l'état séché.

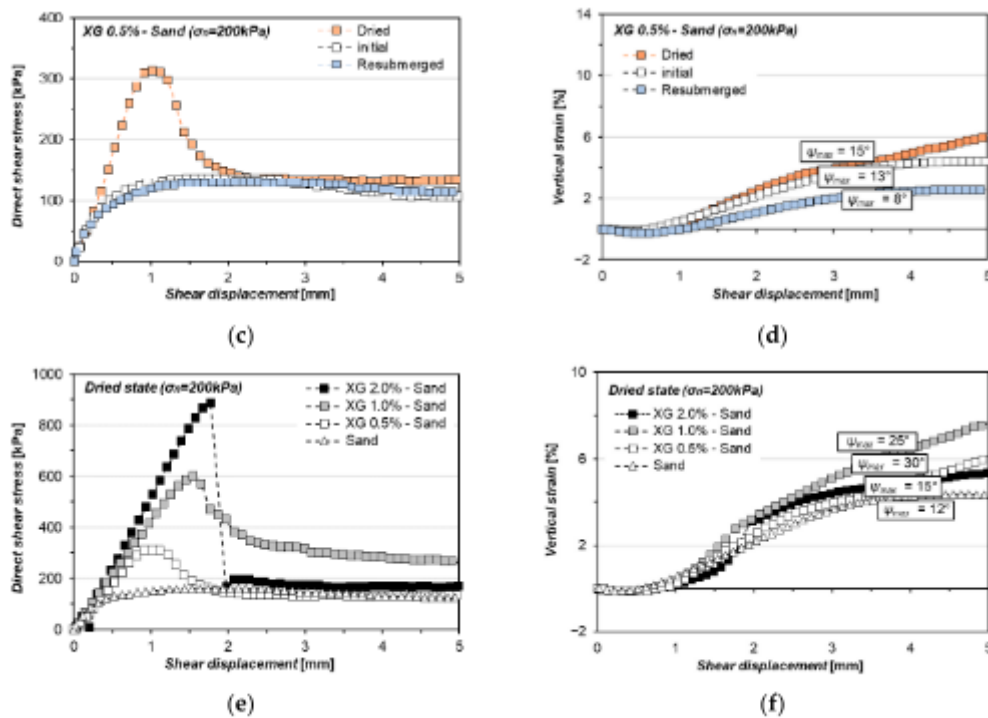


Figure 2. 22: Résultats de l'essai de cisaillement direct du sol traité à la gomme xanthane : (c,e) courbes contrainte de cisaillement direct ( $\tau$ )-déplacement de cisaillement horizontal ( $\delta$ ) ; (d,f) courbes de déformation verticale ( $\varepsilon_v$ )-déplacement horizontal en cisaillement ( $\delta$ ). (M. Lee et al., 2021)

Une autre étude fait par (Elroul et al., 2024), cette étude investigate l'efficacité de l'utilisation de la gomme xanthane comme un liant pour améliorer la résistance au cisaillement et le comportement de changement de volume du sol sableux de Chlef. Des échantillons a été préparés avec différents pourcentages de gomme xanthane ( $XG = 0,25 \%$ ,  $0,5 \%$  et  $1 \%$ ) et des temps de durcissement (7, 14 et 30 jours) à une densité relative moyenne ( $D_r = 50 \%$ ). Sous contraintes normales de 50 KPa, 100 KPa et 200 KPa. Les résultats montrent une amélioration significative de la résistance au cisaillement comme montre dans la figure 2.23 , de l'intercept de cohésion et de l'angle de frottement du sable traité (figure 2.24). L'étude montre le potentiel de l'utilisation de la gomme xanthane en tant que liant microbologique et donne des indications sur l'efficacité à long terme du renforcement du sable.

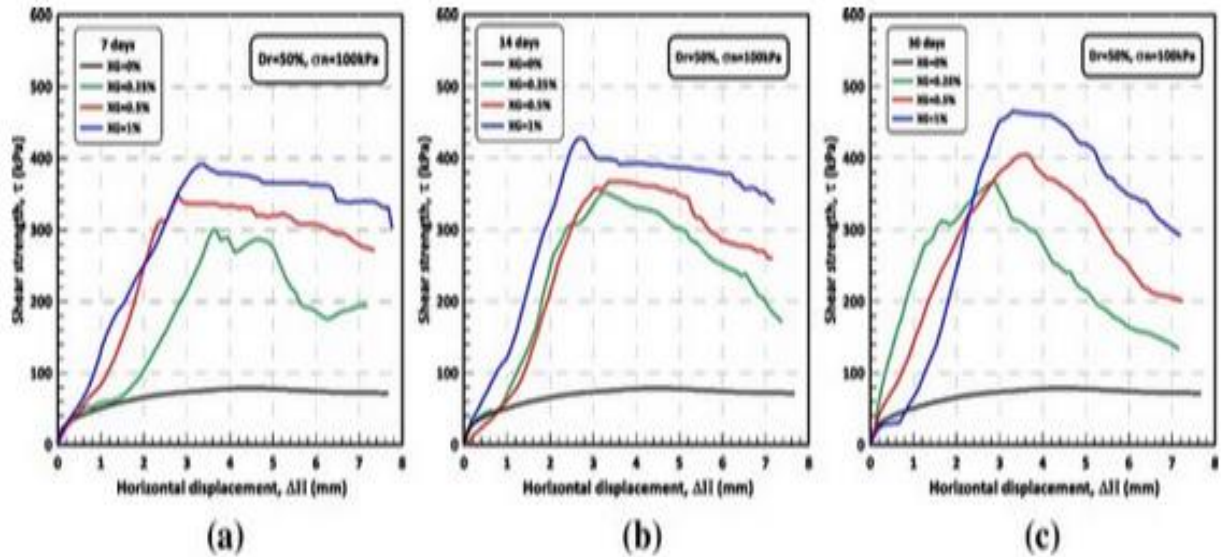


Figure 2. 23: Évolution de la résistance au cisaillement en fonction du déplacement horizontal d'échantillons de sable non traités et traités à la gomme xanthane à différentes teneurs en gomme xanthane et périodes de durcissement de : (a) 7 jours, (b) 14 jours, (c) 30 jours.

(Elroul et al., 2024)

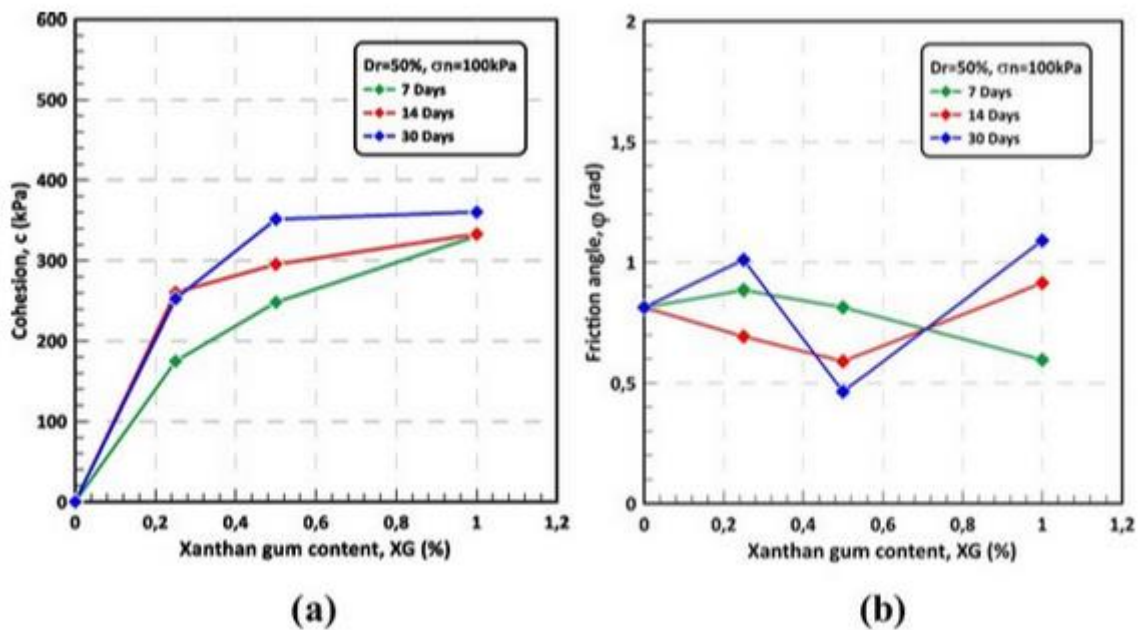


Figure 2. 24: Évolution des propriétés de résistance au cisaillement des échantillons de sable non traités et traités à la gomme xanthane à différentes teneurs en gomme xanthane et périodes de durcissement : (a) intercept de cohésion (b) angle de frottement interne. (Elroul et al., 2024)

(Elroul et al., 2024)

Une étude reportée par (S. Lee et al., 2017) a étudié le comportement de résistance d'un mélange de sable et de gomme xanthane dans trois phases différentes du gel : initiale, sèche et re-submergée. Pour la phase initiale, le test a été effectué au fur et à mesure de la préparation des échantillons ; dans la phase sèche, les échantillons ont été placés dans une chambre de séchage pendant 28 jours ; et les échantillons ré-immersés ont été immergés dans de l'eau distillée pendant 24 heures avant d'effectuer les tests. L'étude a permis de conclure que même un très faible ajout de gomme xanthane au sable peut modifier le comportement de résistance de ce type de sol. Les tests montrent que l'augmentation de la teneur en gomme xanthane dans le mélange initial augmente la cohésion, mais que l'angle de frottement reste constant (Figure 2.25). Dans la phase de gel sec, la cohésion et le frottement augmentent avec l'ajout de gomme xanthane en raison de la formation d'un biofilm à la surface des particules et de la formation d'hydrogels visqueux qui induit l'effet de bio-agglomération. En outre, les angles de frottement du mélange sable-gomme xanthane diminuent à une concentration supérieure à 1 % de gomme xanthane à l'état de submersion.

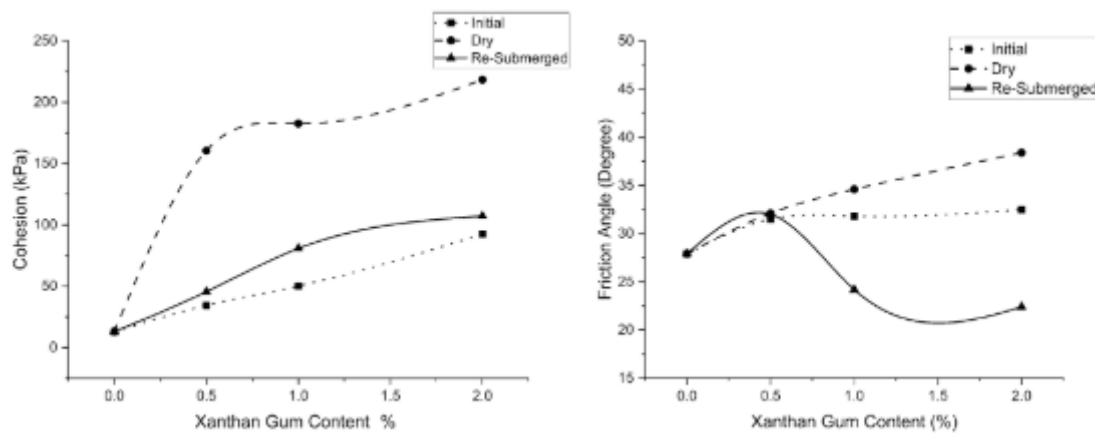


Figure 2. 25: Comportement de la résistance au cisaillement du sable traité à la gomme xanthane par (S. Lee et al., 2017)

### 2.5.1.2 La gomme d'agar

Les algues du genre Agar (*Gelidiella*, *Gracilaria* et *Gelidium*) sont récoltées pour leur couleur rouge, qui est utilisée pour fabriquer l'agar (Kumar et al., 2024). La gomme agar est un polysaccharide et la plupart des gommes agarose sont dérivées de plantes. La structure chimique de la gomme d'agar, telle qu'indiquée par (Lahaye, 2001) dans leurs recherches, est présentée dans la figure 2.26. Ce biopolymère d'origine végétale a été utilisé comme stabilisateur en raison de la texture solide qui se forme lorsqu'il se gélifie.

Les hydrophobes de l'agar se caractérisent par une grande solubilité et une forte capacité à former des gels. Comme l'ont montré (Chang et al., 2015), La principale propriété du gel agar est sa capacité à former un gel réversible en refroidissant une solution aqueuse sans nécessiter d'autres réactifs chimiques.

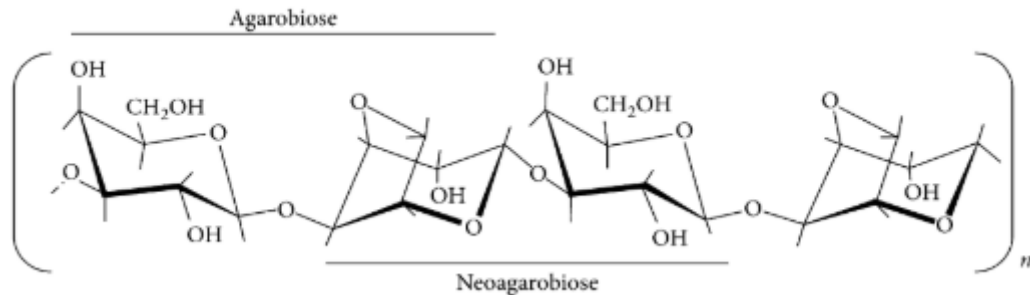


Figure 2. 26: Structure chimique de la gomme agar (Kumar et al., 2024)

En outre, en raison de ses propriétés rhéologiques de cisaillement, il a été largement utilisé pour améliorer la résistance des sols et réduire la pollution de l'environnement (Chang et al., 2020).

(Verma et al., 2024) étudie la performance géotechnique des fines de déchets solides municipales stabilisées avec de la gomme xanthane et de la gomme agar. Cette recherche évalue l'efficacité des gommes xanthane et agar dans l'amélioration des propriétés géotechniques des fines de déchets solides municipaux. Divers essais, notamment de compactage, de résistance à la compression triaxiale et non confinée, ont été réalisés sur des échantillons soumis à différentes périodes de durcissement. Les résultats indiquent une amélioration considérable des propriétés mécaniques des fines de MSW traitées avec de la gomme agar, y compris une augmentation maximale de 58% de la résistance à la compression non confinée (UCS). La gomme agar considérée comme un biopolymère plus efficace pour la stabilisation des fines de MSW, la durée de durcissement contribuant de manière primordiale à atteindre des caractéristiques géotechniques idéales.

La figure 2.27 montre la résistance à la compression non confinée des sols argileux (figure 2.27 (a)) et des sols sableux (figure 2.27 (b)) traités aux biopolymères et séchés à l'air en fonction du temps (c.-à-d. jusqu'à 28 jours). Au cours de l'augmentation de la durée du séchage à l'air libre des sols traités aux biopolymères, la résistance à la compression non confinée des sols argileux/sableux avec les biopolymères (c'est-à-dire la gomme gellane et l'agar) s'améliore. La concentration la plus élevée de biopolymère améliore les valeurs de résistance à la compression dans les sols argileux et sableux (Jang & Jia, 2020).

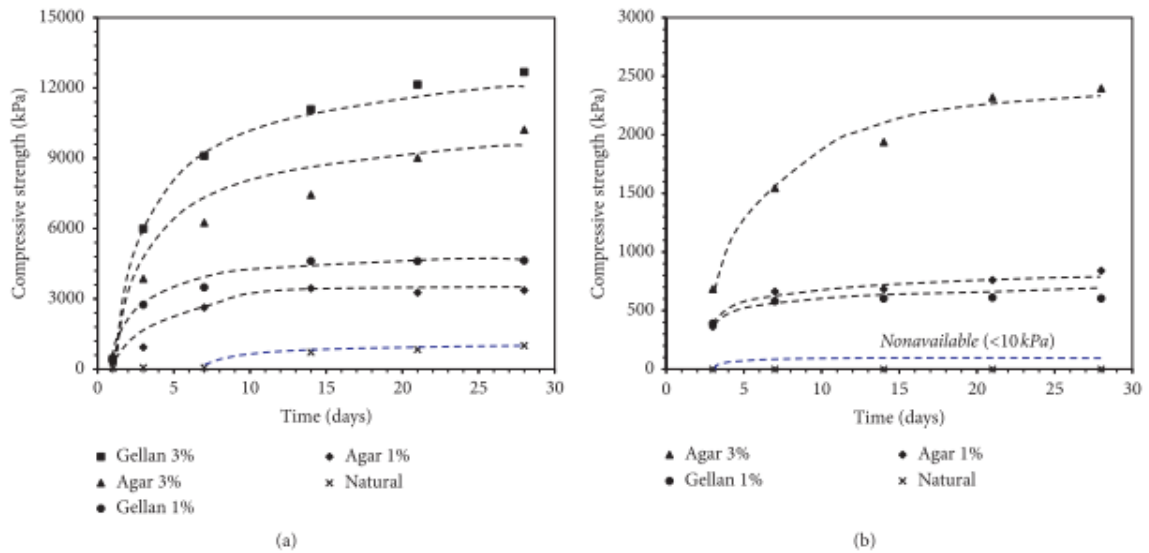


Figure 2. 27: Résistance à la compression non confinée en fonction du temps pour (a) un sol argileux traité aux biopolymères et (b) un sol sableux traité aux biopolymères et séché à l'air à température ambiante ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ). (Jang & Jia, 2020)

(Chang et al., 2015) à étudier l'effet d'agar biopolymère et la gomme de gellane sur la résistance à la compression d'un sable traité par les deux biopolymères comme montre dans la figure 2.28, dans les sols sableux, les biopolymères forment une couche superficielle sur les particules de sable, remplissent les pores ou améliorent les zones de contact entre les particules. En outre, dans les sols sableux séchés, les gels de biopolymères forment des couches minces sur les surfaces des particules de sable avec une légère adhérence. Ainsi, la friction mécanique devient plus critique que la résistance ordinaire des gels de biopolymères. Par conséquent, dans un état sec, il est probable que les sols sableux présentent des valeurs de résistance à la compression similaires, quel que soit le type de biopolymère.

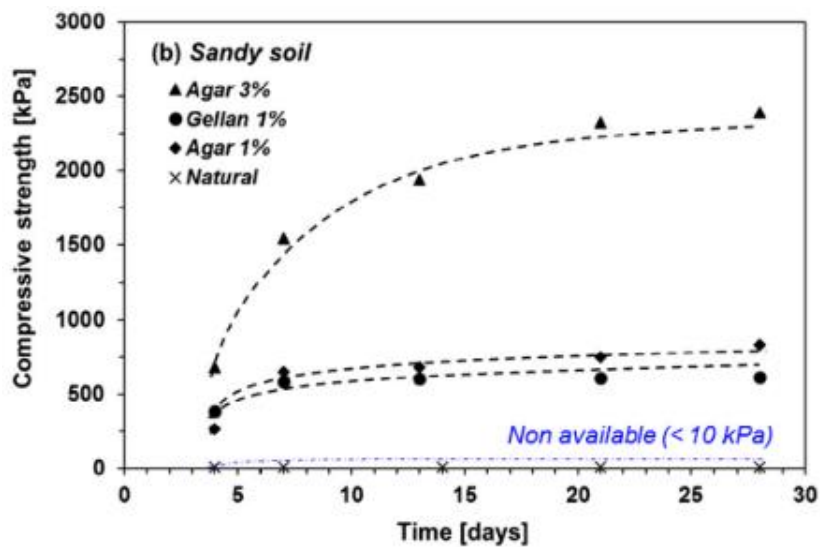


Figure 2. 28: La résistance à la compression non confinée en fonction du temps pour un sol sableux traité aux biopolymères et séché à l'air à température ambiante ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ). (Chang et al., 2015)

### 2.5.1.3 La gomme de guar

La gomme de guar est un polysaccharide obtenu à partir des graines de *Cyamopsis tetragonoloba* (Sivadasan & Sachan, 2016). La composition générale de la gomme de guar est la suivante : galactomannane (75-85%), humidité (8-14%), protéines, fibres et les cendres (Tripathy & Das, 2013). La gomme de guar a un poids moléculaire élevé et est un polymère soluble dans l'eau. La molécule de gomme de guar est constituée d'un squelette  $\alpha$ -D-galactose et  $\beta$ -D-mannopyranose, comme le montre la figure 2.29 (Jang & Jia, 2020).

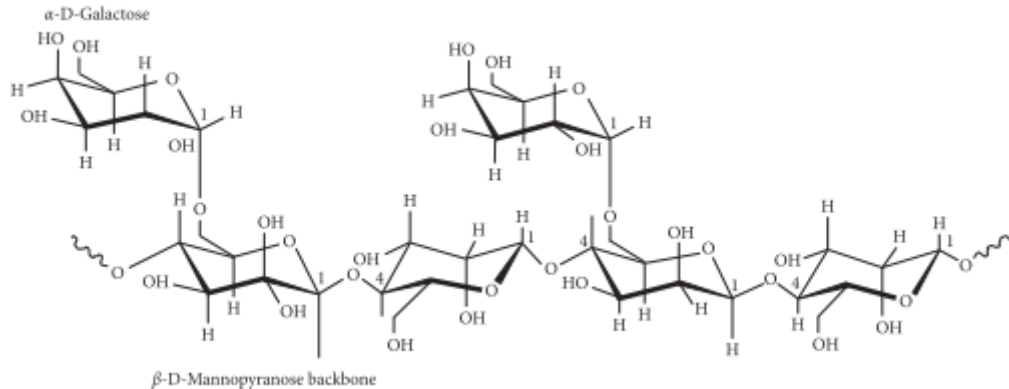


Figure 2. 29: La structure de la gomme de guar (Jang & Jia, 2020)

Il est également observé que l'ajout (concentration de 0,25 à 2 %) de gomme de guar au limon et au sable augmente la cohésion du sable et diminue la perméabilité. (Kumar et al., 2024)

Comme le montre dans la figure 2.30, la résistance à la compression non confinée des combinaisons sol-gomme de guar augmente avec la concentration de gomme de guar. La résistance du sol contenant 2 % de gomme de guar s'est améliorée de 52 % après 90 jours, passant de 221,7 KPa sans traitement à 463,6 KPa. Cette tendance se vérifie pour tous les traitements à la gomme de guar étudiés au fur et à mesure qu'ils se développent. La structure chimique de la gomme de guar joue un rôle dans le développement de liaisons hydrogène entre plusieurs groupes de l'hydroxyle, ce qui contribue à augmenter la résistance. (Kumar et al., 2024)

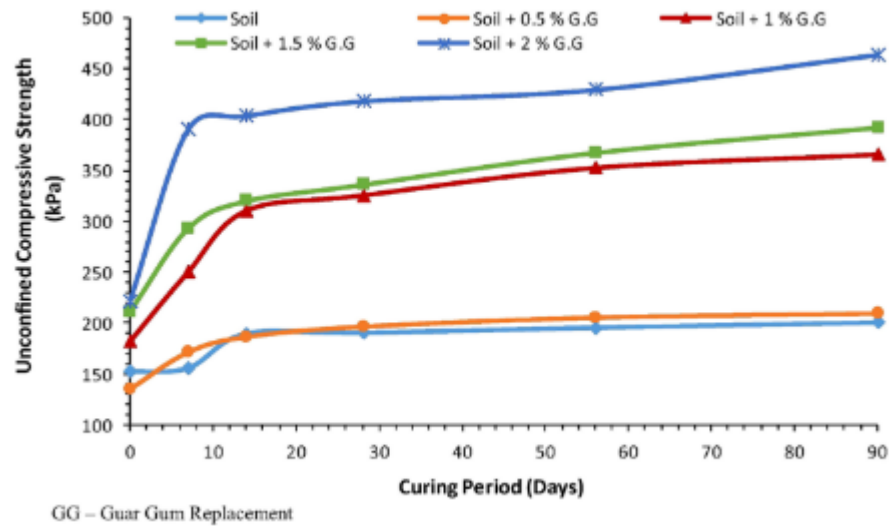


Figure 2. 30: La résistance à la compression en fonction de la période de cure du sol traité à la gomme de guar d'après (Sujatha & Saisree, 2019)

Une autre investigation sur un sol sableux traité par trois types différents de biopolymères fait par (Ayeldeen et al., 2016), les enveloppes de rupture du sable/biopolymères (par exemple le sable pur, 2 % de gomme guar, 2 % de gomme amidon modifiée et 2 % de gomme xanthane) après 5 semaines de durcissement sont tracées par les essais de cisaillement direct, comme le montre la figure 2.31. La cohésion du sable traité aux biopolymères est plus élevée que celle du sable pur. Néanmoins, la cohésion dépend du type de biopolymère. La cohésion du sable traité à la gomme de guar est la plus élevée parmi les trois biopolymères.

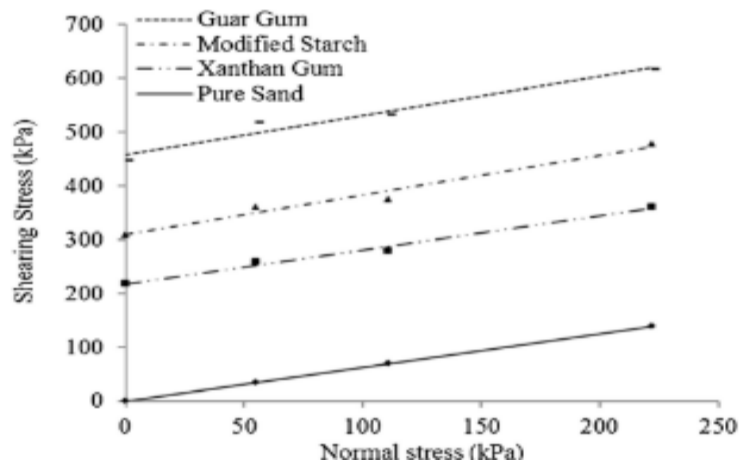


Figure 2. 31: Enveloppes de rupture des mélanges sable/biopolymère avec une concentration de 2 % et un temps de durcissement de 5 semaines (Ayeldeen et al., 2016).

La courbe contrainte-déformation (Figure 2.32) du sol non traité présente un pic important avec un comportement de rupture fragile. L'échantillon de sol se casse à 5% de déformation, avec une augmentation progressive et considérable de la résistance à des déformations plus faibles. Avec l'ajout de gomme de guar, le comportement contrainte-déformation montre un



changement significatif dans le comportement du sol. La déformation de rupture augmente jusqu'à près de 18% avec l'ajout de 0,5% de biopolymère, avec une augmentation supplémentaire de la teneur en gomme guar, la contrainte maximale augmente et il y a un léger déplacement de la déformation correspondante vers le côté inférieur. Au-delà de l'ajout de 1,5 % de gomme de guar, cependant, le sol revient au comportement du sol non traité, montrant une rupture fragile. La stabilisation du sol avec le biopolymère change la nature de la matrice du sol par la formation d'hydrogels. Au stade initial, les molécules d'eau des polymères tentent de s'échapper, ce qui entraîne la formation de chaînes de polymères complexes. Sans cure à l'air, le processus d'hydratation et la formation d'hydrogels ne sont pas complets, car ils ont tendance à enrober les particules d'argile chargées négativement dans les espaces poreux, et l'augmentation de la résistance est principalement liée à l'effet de la solution de gomme visqueuse (Sujatha & Saisree, 2019).

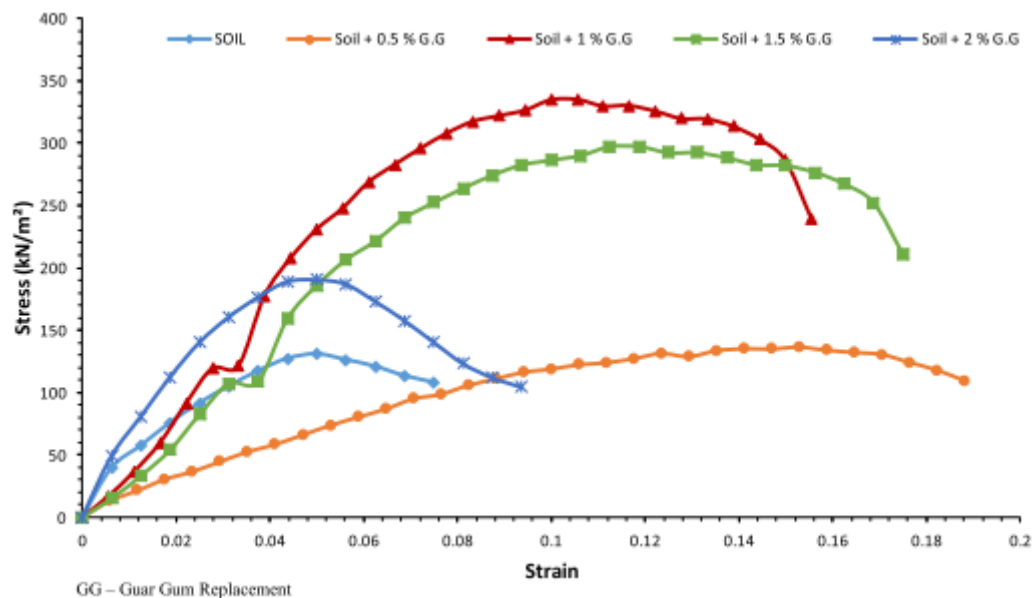


Figure 2. 32: Comportement contrainte-déformation d'un sol non traité et d'un sol traité à la gomme de guar. (Sujatha & Saisree, 2019)

(Banne et al., 2024) étudie le comportement au cisaillement d'un sol limoneux traité par la gomme de guar, les résultats montrent que la cohésion du sol mélangé avec 2 % de gomme de guar a augmenté de 93,33 % et l'angle de frottement interne a augmenté de 31,52 % ; toutefois, aucune autre augmentation de la cohésion ou de l'angle de frottement interne n'a été constatée. Ils concluent que la résistance au cisaillement des sols traités avec de la gomme de guar s'est améliorée.



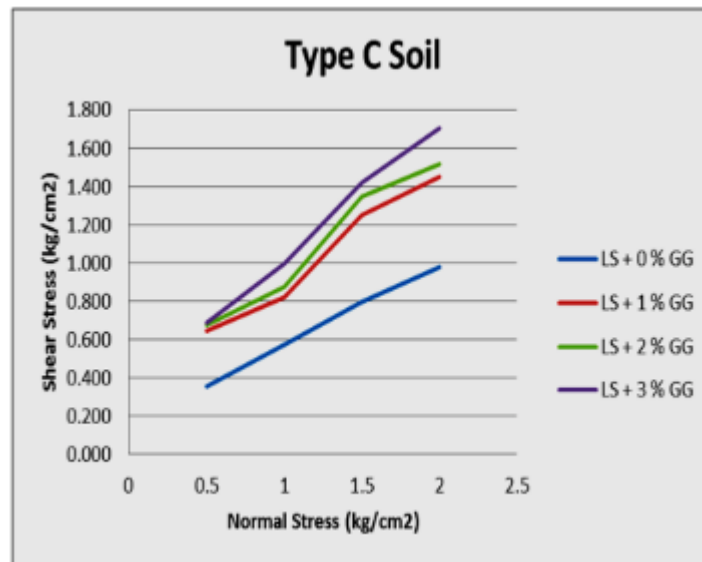


Figure 2. 33: Résultats de l'essai de cisaillement direct d'un sol latéritique traité avec la gomme Guar (Banne et al., 2024)

## 2.6 Conclusion

Ce chapitre est divisé en deux parties. La première partie traite l'amélioration des sols par l'inclusion de fibres, une technique de plus en plus utilisée par rapport à d'autres méthodes. Il s'agit d'une méthode économique dont la mise en œuvre ne nécessite pas de ressources particulières et qui peut être appliquée à plusieurs types de sols.

La deuxième partie examine les différents types des biopolymères qui influencent le mécanisme de traitement par biocimentation et leur impact sur le comportement du sol traité. D'après les résultats de différents travaux de recherche, les biopolymères peuvent améliorer la résistance au cisaillement et les caractéristiques mécaniques des sols sableux. Cette amélioration dépend de plusieurs paramètres liés aux caractéristiques du biopolymère et du sol.

Les chapitres suivants présentent les matériaux utilisés dans cette thèse. En outre, le dispositif expérimental et les différentes procédures d'essais effectuées seront également détaillés.

## **CHAPITRE III : DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET CARACTERISATIONS DES MATERIAUX UTILISES**

---

Le troisième chapitre explique la méthodologie de travail et les procédures expérimentales. Ce chapitre présente également le matériel utilisé, le mode opératoire suivi et les caractéristiques physiques des matériaux utilisés, à savoir le sol (sable) et le matériau de renforcement (fibres synthétiques et recyclée) et le biopolymère.

### 3.1 Introduction

Ce chapitre présente le dispositif expérimental et le mode opératoire utilisés au sein du laboratoire pour réaliser une série d'essais et analyser le comportement du sable avec et sans renforcement. Nous commencerons par présenter le dispositif utilisé, puis nous décrirons les principales étapes de la réalisation d'un essai. Ensuite, nous allons présenter les différentes étapes du mode opératoire d'un essai de cisaillement à l'aide d'une boîte de cisaillement, d'un appareil triaxial et l'appareil de cisaillement simple dynamique. La méthode de préparation des échantillons de sable renforcé et non renforcé en vue de réaliser des essais pour reproduire de manière appropriée l'état initial du sol, en tenant compte des caractéristiques des matériaux utilisés, est très importante.

### 3.2 3.2. Dispositif expérimental

Trois types de dispositifs expérimentaux ont été utilisés dans cette étude. Une boîte de cisaillement direct utilisé pour l'étude du comportement mécanique du sable renforcé par des fibres recyclée, un appareil triaxial statique pour l'étude du comportement drainé et aussi pour l'essai de compression simple, l'appareil de cisaillement dynamique simple pour le comportement cyclique du sable renforcée par des fibres synthétique.

#### 3.2.1 3.2.1. Essai à la boîte de cisaillement

##### 3.2.1.1 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  $\sigma_n$  (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  $\Delta L$ . La force horizontale  $T$  nécessaire pour assurer ce déplacement est mesurée en fonction de  $\Delta L$ .

##### 3.2.1.2 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 ( $\varphi$ ).

Les travaux de recherche présentés dans cette étude ont été effectués au Laboratoire de mécanique de sol de l'école national supérieur de l'hydraulique (ENSH) de Blida, 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 3.1).



Figure 3. 1: Boîte de cisaillement direct du laboratoire de mécanique de sol (ENSH BLIDA)

### 3.2.1.3 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 3.2).



Figure 3. 2: Boîte de cisaillement.

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 entrée dans 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 ( $\phi$ ).

### 3.2.1.4 Préparation des échantillons

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 :

$$m_s = \frac{(V_T + \gamma_s)}{(1 + e_{\max}(1 - D_r) + D_r \times e_{\min})} \quad (3.1)$$

$V_T$ : Volume total d'échantillon ;

$\gamma_s$ : Poids volumique des grains solide ;  $e_{\max}$  : Indice des vides maximal ;

$e_{\min}$  : Indice des vides minimal;

$D_r$  : Densité relative initiale.

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

- ✓ Contrainte de cisaillement en fonction des déplacements horizontaux :  $\tau = f(\Delta H)$ ;
- ✓ Déplacement vertical en fonction des déplacements horizontaux :  $\Delta V = f(\Delta H)$ ;
- ✓ Contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale  $\tau = f(\sigma_N)$   
 Dans cette étude, soixante essais de cisaillement direct ont été réalisés sur des échantillons de sable. Il y présentait six échantillons non renforcés et cinquante-quatre échantillons renforcés avec des fibres recyclées. La figure 3.3 montre deux types de préparation des échantillons : des échantillons secs et des échantillons humides avec une teneur en eau de 4 %. Tous les

essais ont été réalisés sur des échantillons de sable de densité relative moyenne ( $Dr = 49\%$ ) et faible ( $Dr = 25\%$ ). Un appareil d'essai de cisaillement direct de dimensions  $60 \times 60$  mm et d'une épaisseur d'échantillon de 25 mm a été utilisé. La préparation de l'échantillon a consisté à déterminer la masse de sable et de fibres requise dans le mélange.

La concentration de fibres ( $F_c$ ) dans le composite est exprimée en pourcentage de la masse sèche de sable. Le poids et la teneur en sable utilisés pour créer une éprouvette renforcée par des fibres ont été supposés donner le même volume ( $V$ ) et le même taux de vide ( $e_0$ ) qu'une éprouvette non renforcée (Anagnostopoulos et al., 2013). Dans ce contexte, une partie de la masse solide totale a été remplacée par un matériau de plus faible densité, tout en respectant la même masse totale (Michalowski, 2002)

$$F_c(\%) = 100 \times (W_f/W_s) \quad (3.2)$$

Où  $W_f$  et  $W_s$  représentent respectivement le poids des fibres et du sable sec. Du sable séché au four et tamisé à 2,5 mm a été ajouté et mélangé avec les fibres (figure 3.3).



Figure 3. 3: Mélange de sable et de fibres : (a) fibre de polypropylène ; (b) fibre de plastique recyclée

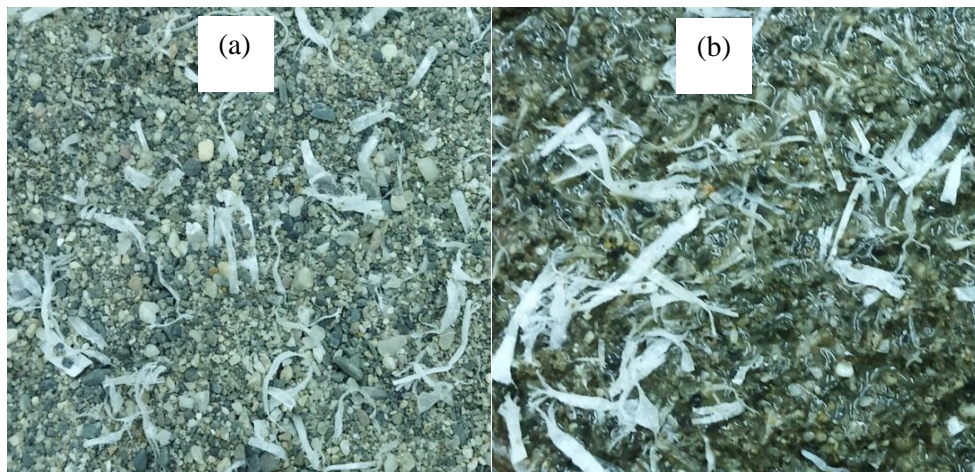


Figure 3. 4: Préparation des échantillons pour (a) les échantillons secs ; (b) les échantillons humides

### 3.2.2 Essai à l'appareil triaxial

#### 3.2.2.1 Principe de l'essai

L'essai triaxial est largement utilisé en mécanique des sols pour déterminer la résistance au cisaillement du sol dans différentes conditions de drainage et de chargement. Avec l'appareil triaxial, des essais de compression dans des conditions non drainées ( $\Delta U = 0$ ) et drainées ( $\Delta U \neq 0$ ) peuvent être menés sous chargement monotone et cyclique, en contrôlant les déformations et les contraintes.

Dans ce test, un échantillon de sol cylindrique est soumis à un champ de contrainte uniforme caractérisé par un plan horizontal hydrostatique et une contrainte verticale. L'échantillon est placé entre deux embases (le matériau est séparé des embases par des pierres poreuses) et une membrane étanche entoure l'échantillon. L'ensemble du dispositif est contenu dans une cellule remplie d'eau, dont le volume peut être réglé à l'aide d'un robinet. L'essai reste donc biaxial, avec  $\sigma_1 = \sigma_2$ . Une pression axiale est appliquée à l'aide d'un piston (une pression radiale peut également être appliquée), le liquide de confinement étant généralement de l'eau. On peut alors soit garder le volume d'eau constant et mesurer la pression interstitielle, soit imposer une pression interstitielle (généralement nulle) et mesurer le volume d'eau drainé. Enfin, nous déterminons les paramètres du sol ( $c$ ,  $c'$ ,  $\phi$  et  $\phi'$ ) en utilisant trois types d'essai triaxiaux.

#### 3.2.2.2 Appareillage

Le dispositif expérimental utilisé pour réaliser le programme expérimental en vue d'analyser le comportement mécanique. Ce dispositif est placé au sein du laboratoire de mécanique de sol à l'université de Biskra. L'appareil triaxial est nécessaire pour évaluer la résistance au cisaillement d'un échantillon cylindrique dans des conditions variant d'un cas à l'autre. Il comprend une cellule triaxiale, une presse pour appliquer la charge, un volumètre pour déterminer les changements de volume et un dispositif pour le contrôle des pressions autour et à l'intérieur de l'échantillon.

Le schéma de la cellule triaxiale, présenté à la figure 3.5, se compose de deux embases : une embase inférieure placée au bas de la cellule, une embase supérieure et une éprouvette cylindrique de sol placée entre les deux embases et contenant deux pierres poreuses. Les embases sont perforées pour permettre à l'eau de circuler dans l'éprouvette. En outre, la cellule est équipée d'un capteur de force relié à un piston pour maintenir le contact avec l'éprouvette et des capteurs de pression.



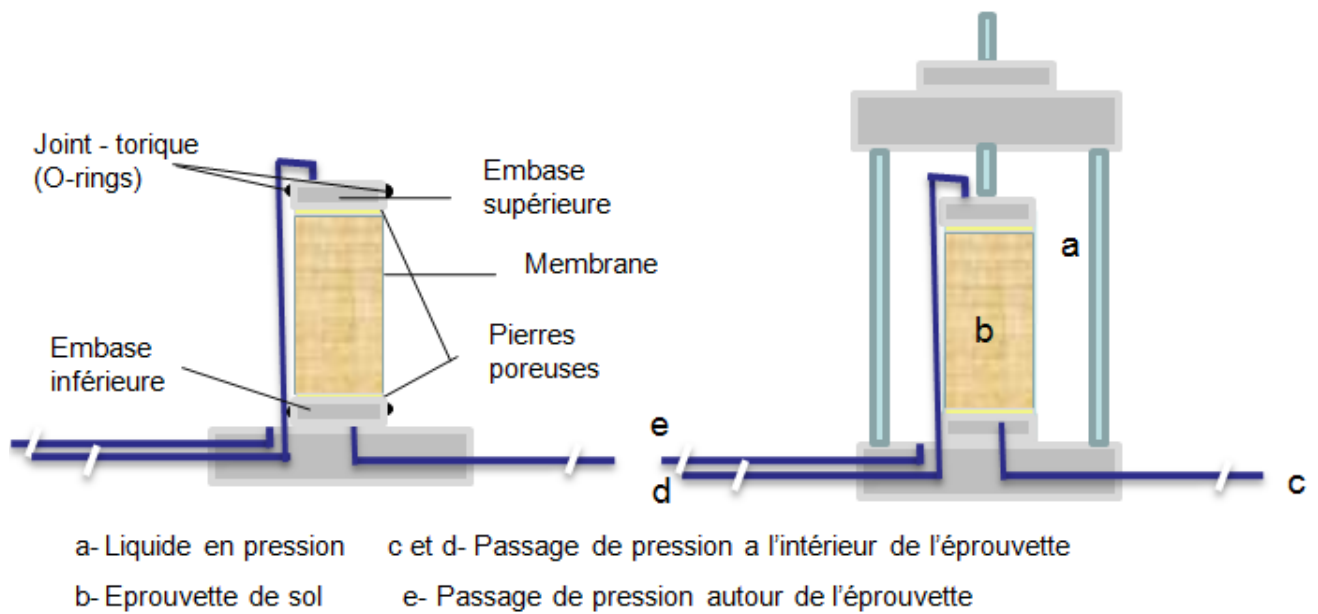


Figure 3. 5: Schéma de la cellule triaxiale utilisée.

Le système de pression à air comprimé comprend deux cellules air-eau. Ces cellules sont reliées d'un côté à un compresseur d'air, et de l'autre côté de chaque cellule à un capteur de pression de confinement et à un capteur de pression à l'intérieur de l'éprouvette (voir figure 3.6).



Figure 3. 6: Système de pression avec les cellules Air-eau

Le système contient un programme d'acquisition de données assisté par ordinateur pour le contrôle et la collection des données. Il se compose d'un voltmètre et d'un multimètre reliés à un ordinateur portable (figure 3.7).





Figure 3. 7: Système de pilotage et d'acquisition

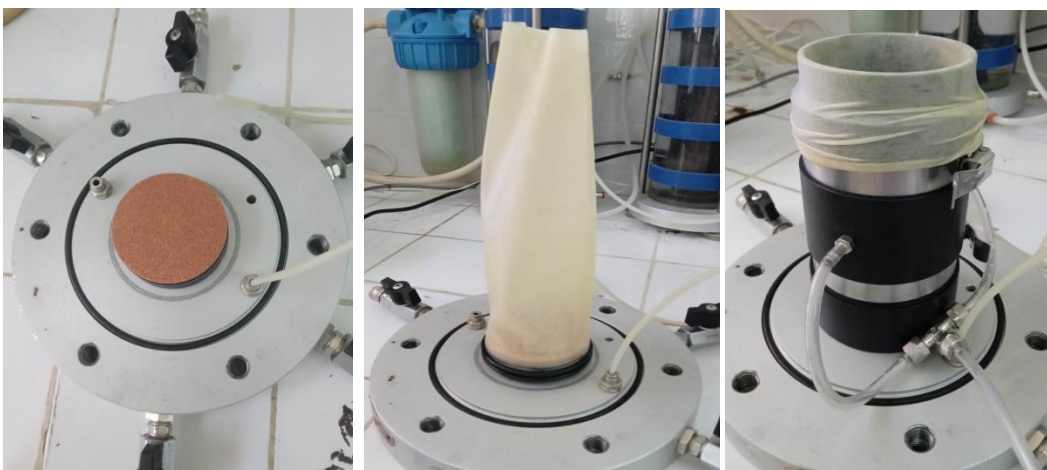
### 3.2.2.3 Procédures d'essai et méthodes opératoires

L'essai triaxial se caractérise par cinq (05) étapes différentes :

- 1- Mise en place de l'éprouvette ;
- 2- Saturation de l'éprouvette ;
- 3- Consolidation ;
- 4- Ecrasement (cisaillement) ;
- 5- Démontage de l'essai.

#### a- Mise en place de l'échantillon

Lors de la mise en place de l'échantillon, le sol est placé dans la membrane entre les deux embases. La méthode de préparation et la densité relative souhaitée doivent être prises en compte pour calculer la masse de l'échantillon qui sera mise en place.



(a)

(b)

(c)

Figure 3.8: La mise en place de l'échantillon

- **Préparation de l'échantillon**

L'échantillon est cylindrique et présente les dimensions suivantes :

Hauteur (H) = 140 mm

Diamètre (D) = 70 mm

Pour commencer l'essai, on place une pierre poreuse sur le fond de la cellule (figure 3.8 a). Fixer la membrane qui contiendra l'éprouvette avec deux joints en caoutchouc autour de la base (figure 3.8 b). Placez ensuite un moule cylindrique et attachez la membrane à ce moule (figure 3.8 c). Appliquez une pression négative sur la membrane pour vous assurer qu'elle est collée et serrée sur le moule sans former de creux.

Après avoir pesé l'échantillon et ajouté de l'eau, il faut les mélanger jusqu'à ce qu'ils soient parfaitement homogènes. Pour l'éprouvette humide, il faut appliquer la méthode de Lade. Diviser le poids total en sept couches, chacune ayant une épaisseur de 2 cm (figure 3.9a). Comprimer chaque couche et mesurer la longueur restant à la surface de l'échantillon (figure 3.9 b). Complétez toutes les couches restantes et installez le deuxième pierre poreuse (figure 3.9 c). Placez la embase supérieure et fixez l'éprouvette à l'aide des deux joints en caoutchouc (figure 3.9 d).

Appliquer une pression négative d'environ 30 kPa pour stabiliser le spécimen, en contrôlant l'absence de fuite (figure 3.9 e), (figure 3.9 f). Ensuite, retirez le moule et installez la cellule avec toutes ses parties tout en contrôlant les captures de pression, les captures de déplacement et les captures de force. Lorsque vous avez terminé, attachez la cellule de manière diagonale, remplissez la cellule avec de l'eau et éliminez l'air par une ouverture située au-dessus de la cellule. Enfin, appliquer une pression de confinement de 50kPa.

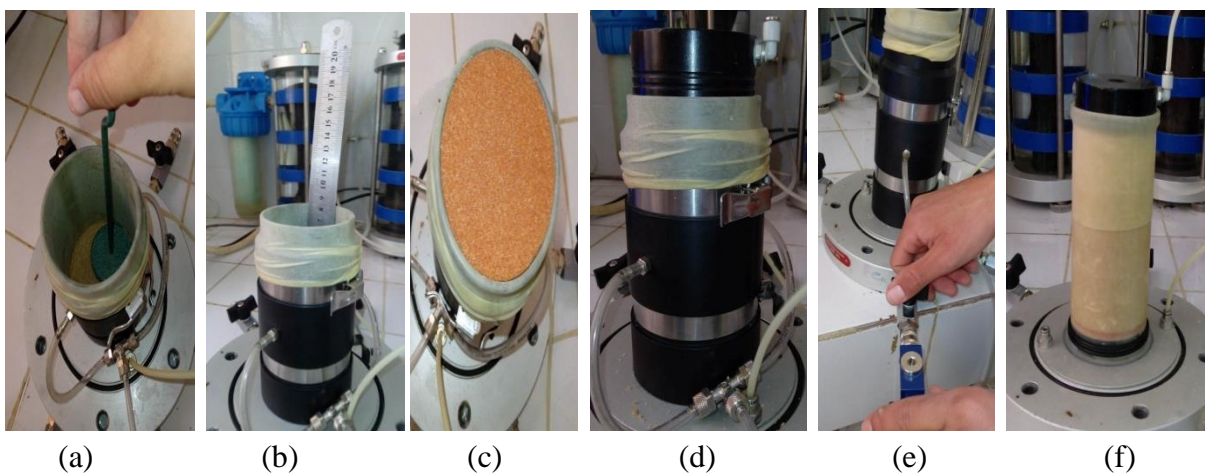


Figure 3.9: Préparation de l'éprouvette

### **b. Saturation de l'éprouvette**

Une fois démontée, la cellule est installée et remplie d'eau. Une contrainte de confinement initiale de 25 kPa est appliquée pour annuler la contre-pression à l'intérieur de l'éprouvette. L'échantillon est soumis à une saturation en laissant la circulation de l'eau désaérée. Selon la norme ASTM D4767-11, l'échantillon est saturé jusqu'à une contrainte de 50 kPa (supérieure à 35 kPa). Le niveau de saturation est confirmé par la mesure du coefficient de Skempton ( $B = \Delta u / \Delta \sigma$ ). Si l'échantillon n'est pas complètement saturé, la saturation est améliorée en augmentant progressivement les pressions autour et à l'intérieur de l'échantillon. Dans le cas d'un sol sableux, on considère que le niveau de bonne saturation de l'échantillon est atteint lorsque  $B=90\%$ .

### **c. Consolidation**

Cette étape consiste à appliquer une contrainte uniforme à l'échantillon pour simuler les contraintes in situ. Le confinement est réalisé à l'aide d'un système air-eau contrôlé par un régulateur de pression. Les échantillons sont consolidés puis cisailés à des contraintes effectives ( $\sigma'_3$ ) de 50, 100 et 200 kPa.

### **d. Écrasement (cisaillement)**

Après la consolidation, la phase de cisaillement commence. Le cisaillement sous compression est obtenu en augmentant le déviateur de contrainte jusqu'à la rupture à une vitesse de déformation de 1 % par minute pour les essais triaxiaux monotones drainés (voir figure 3.10).



Figure 3. 10: Cisaillement de l'éprouvette

### **e. Démontage de l'essai**

À la fin de l'essai, après une diminution de la pression appliquée (tout en s'assurant que la pression latérale ' $\sigma'_3$ ' reste supérieure à la pression à l'intérieur de l'éprouvette 'u'), l'eau est vidée de la cellule, puis l'éprouvette est démontée.

### 3.2.3 Essai de cisaillement simple dynamique

Les essais de notre étude ont été réalisés à l'aide d'un appareil d'essai de cisaillement simple cyclique produit par la marque Wille Geotechnik, la réalisation des essais est effectuée au laboratoire de recherche du mécanique de sol à l'université de Ankara, Turquie. Ce dispositif permet d'effectuer des chargements en 1D, 2D ou 3D. Alors que les chargements 1D et 2D sont effectués par des pistons situés sur les côtés droit et gauche de l'appareil, le chargement 3D est effectué sur l'appareil au moyen d'un piston qui se trouve en position verticale, et ce piston a une capacité d'application de force de 10 kN. Les chargements effectués sont de forme sinusoïdale ou aléatoire en entrant n'importe quel enregistrement de déplacement de n'importe quel séisme. La figure 3.11 montre l'appareil utilisé dans l'étude. On constate que cette technique est plus proche des autres méthodes pour la détermination du potentiel de liquéfaction avec ce type d'appareil.



Figure 3. 11: Dispositif de cisaillement simple cyclique utilisé dans cette étude

#### a. Préparation des échantillons

La méthode du damage humide a été la technique préférée pour la préparation des échantillons. (Ladd, 1978) a démontré que cette méthode est efficace, acceptable et pratique. En outre, cette technique permet d'éviter la ségrégation des fibres et de maintenir l'uniformité des échantillons renforcés. Un avantage de cette méthode est sa capacité à préparer des échantillons avec une large fourchette de rapports de vide (Ishihara, 1993). Plusieurs études expérimentales publiées supposent que les fibres sont distribuées et orientées de manière aléatoire dans la masse du sol. La distribution et l'orientation aléatoires permettent de créer une isotropie de la résistance du sol et de limiter les déformations localisées (Hejazi et al. 2012). Cependant, il a également été rapporté que les fibres ont tendance à être orientées

horizontalement dans la préparation des échantillons renforcés en utilisant la technique de damage humide.

### **b. Procédure d'essai**

Les expériences réalisées dans le cadre de cette étude ont été effectuées à l'aide de l'essai de cisaillement simple cyclique. Ce dispositif permet d'effectuer des chargements en une, deux et trois dimensions (1D, 2D et 3D). Les chargements 1D et 2D sont effectués à l'aide des pistons situés sur les côtés droit et gauche de l'appareil, tandis que le chargement 3D est effectué à l'aide du piston placé en position verticale sur l'appareil et ce piston a une capacité de force de 10 kN. L'appareil peut appliquer une charge sinusoïdale ou une charge aléatoire, formée par la saisie de l'enregistrement du déplacement d'un mouvement du sol. L'appareil utilisé dans l'étude est illustré à la figure 3.12.

Des échantillons d'une densité relative de 60 % ont été testés, car l'objectif principal de cette étude était d'observer l'effet du renforcement par fibres dans des couches de sable dense saturées d'eau. Afin de s'assurer que les échantillons sont saturés d'eau et d'empêcher les bulles d'air qui restent dans l'échantillon, une pré-saturation du  $CO_2$  a été appliquée pendant 20 minutes sur les échantillons, du bas vers le haut. Après le rinçage au  $CO_2$ , l'eau désaérée a été circulée dans l'échantillon de bas en haut, afin d'assurer la saturation complète de l'échantillon en eau. Une fois le processus de saturation terminé, la contrainte effective a été appliquée à l'échantillon et l'échantillon a été consolidé de manière anisotrope sous cette contrainte. Pendant la sollicitation cyclique, une contrainte de cisaillement sinusoïdale uniforme d'une fréquence de 0,1 Hz a été appliquée dans la direction horizontale, ce qui est recommandé pour ce type d'équipement d'essai (L. Chen, 2008), bien que cela soit inférieur à la fréquence typique d'un tremblement de terre. Cette contrainte se développe à l'aide du mouvement horizontal de la plaque rouge sous le moule de l'échantillon, comme le montre la figure 3.14. Les pressions interstitielles développées pendant les essais ont été mesurées par des capteurs de pression sensibles, situés au-dessus et au-dessous de l'échantillon. Tous les paramètres de l'expérience ont été automatiquement enregistrés par le logiciel de l'appareil d'essai de cisaillement simple cyclique dans le fichier d'expérience, sous la forme de 20 lectures pour chaque cycle. Dans les expériences, on a supposé que les échantillons se liquéfiaient dès qu'un excès de pression d'eau interstitielle égal à la contrainte verticale effective initiale se déclenchait. Dans l'étude, 15 essais de cisaillement simple cyclique ont été réalisés dans des conditions non drainées et pour des valeurs de contraintes effectives de 50, 100 et 200 kPa.



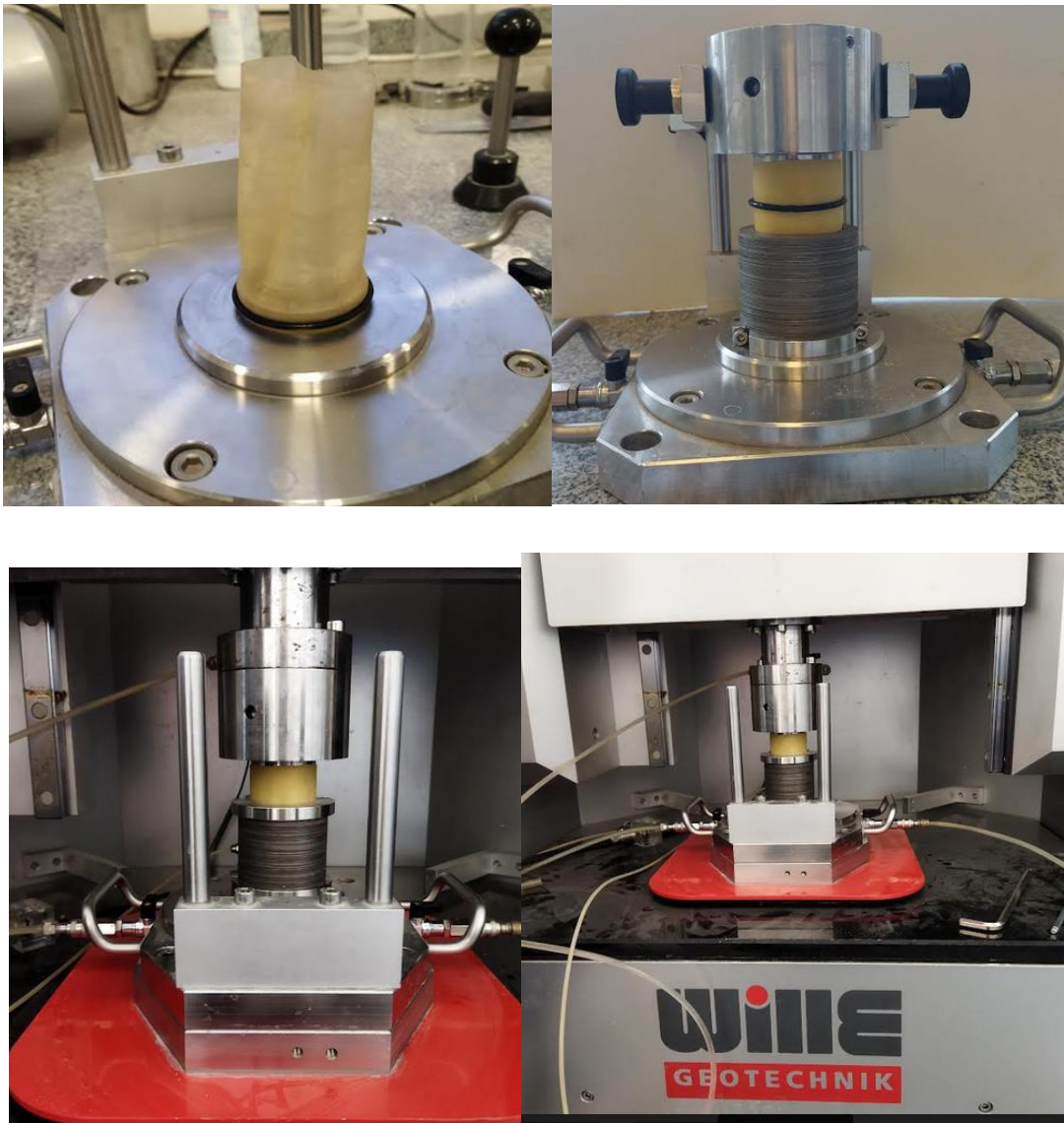


Figure 3. 12: Les différentes phases de la préparation de l'échantillon

### 3.3 Matériaux utilisés

#### 3.3.1 Sol

Plusieurs types de sable ont été utilisés dans cette étude, à savoir le sable de dune de la région de Djamaa dans le Sud-est de l'Algérie (Oued souf) leur codage utilisé (S1). Le deuxième sable est le sable de dune de la région d'El-Hajeb à Biskra (S2), et enfin le sable de la région de Zemmouri à Boumerdas (S3), au nord de l'Algérie. Tous ces types de sable ne contiennent pas de particules fines, la figure 3.13 montre la distribution granulométrique du sable.

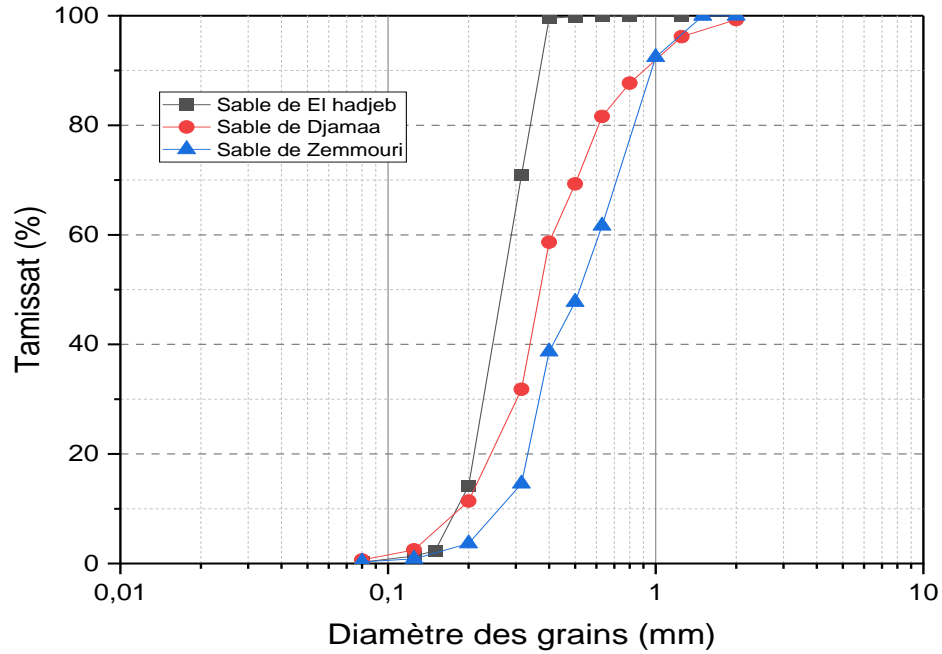
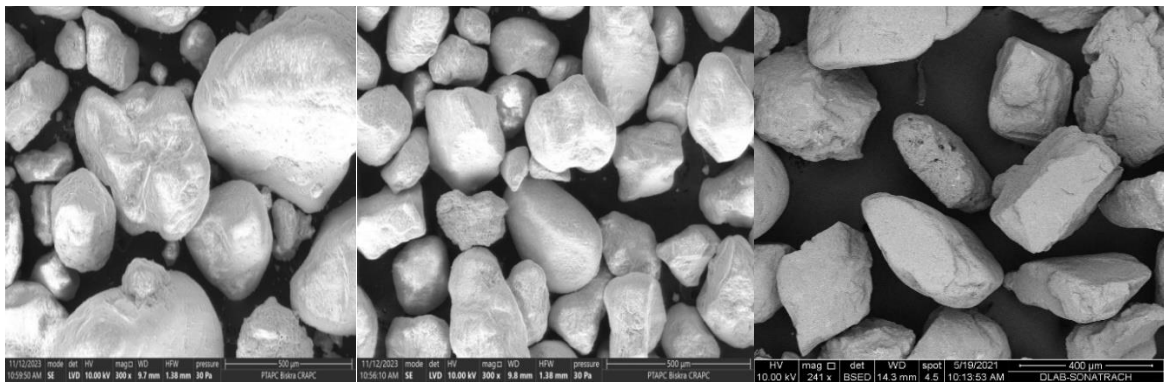


Figure 3. 13: Courbe granulométrique du sable utilisé

Les deux types de sables d'une (S1 et S2) et (S3) sont classés comme sables mal calibrés (SP) selon le système "Unified Soil Classification System" (USCS).

La figure 3.16 montre une vue microscopique (MEB) des différents types de sable, le sable utilisé présente une angularité différents.



(a)

(b)

(c)

Figure 3. 14: Image MEB de (a) sable de Djamaa (S1), (b) sable El-Hadjeb (S2) et (c) Sable de Zemmouri (S3)

Les caractéristiques des sables sont présentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3. 1 : Caractéristiques du sables étudié

Propriétés du sable	S1	S2	S3	Normes d'essai standard
Taille moyenne des grains, D50 (mm)	0.38	0.28	0.51	ISO 17892-4
Coefficient d'uniformité, Cu	2	1.66	2.21	ISO 17892-4
Coefficient de courbure, Cc	1.20	0.97	0.83	ISO 17892-4
Classification USCS	SP	SP	SP	USCS SYSTEM
Densité spécifique moyenne, G	2.65	2.67	2.64	ISO 17892-3
Indice de vide maximal, $e_{max}$	0.75	0.88	0.79	NF P 94-059
Indice de vide minimal, $e_{min}$	0.50	0.66	0.51	NF P 94-059

### 3.3.2 Les matériaux de renforcement et de traitement

#### a. Fibre de déchets plastique

Dans cette étude, on a utilisé des fibres de pots de yaourt recyclés d'une longueur moyenne de 10 à 18 mm et d'un diamètre de 1 à 3 mm, comme le montre la figure 3.15. La fibre était composée d'un polymère à base de polypropylène d'une densité moyenne de  $1,02 \text{ g/cm}^3$ . Pendant les essais, la teneur en fibres est variée de 0 % à 0,8 %, avec des incréments de 0,2 %. Cette variation a été choisie sur la base d'études antérieures démontrant que la teneur optimale en fibres pour les sols renforcés se situait entre 0,5 % et 1 %. Parmi ces études antérieures, on peut citer ([Consoli et al., 2005](#); [Eldesouky et al., 2015](#); [Peddaiah et al., 2018](#)).



Figure 3. 15: Fibre recyclée

#### b- Fibre de polypropylène

La fibre utilisée dans cette étude est la fibre de polypropylène (figure 3.16), un matériau synthétique à base de polymère PP. La fibre de polypropylène est un matériau inerte qui présente une faible conductivité thermique et une résistance élevée aux acides, aux alcalins et aux sels. Elle est couramment utilisée pour améliorer la rigidité des échantillons et augmenter la ductilité des sols renforcés par des fibres. La longueur de la fibre monofilament était de 6 et



12 mm. Les paramètres physiques et mécaniques de cette fibre sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3. 2 : Paramètres de base de la fibre de polypropylène

Type	Fibre (6mm)	Fibre(12 mm)
Surface de la fibre	Ronde	Ronde
Longueur des fibres	6 mm +/- 1mm	12 mm +/- 1mm
Epaisseur	30-32 micron	30-32 micron
Résistance à la traction	427-495 MPa	467-548 MPa
Module d'élasticité	4457-5110 MPa	4048-5674 MPa
allongement	20-25%	20-25%
Densité spécifique	0.91 g/cm <sup>3</sup>	0.91 g/cm <sup>3</sup>
La tenacité	Haute tenacité	Haute tenacité
Résistance biologique	Stable	Stable
Couleur	Transparent	Transparent



Figure 3. 16: Fibres de polypropylène utilisées dans cette étude

### c- le biopolymère Xanthane

Le biopolymère utilisé dans cette étude est la gomme xanthane (XG) de qualité industrielle, qui se présente sous la forme d'une poudre jaune à température ambiante et qui peut former des gels de consistance et de viscosité élevées dans des solutions aqueuses. La gomme xanthane ( $C_{35}H_{49}O_{29}$ ) est un polysaccharide anionique, un biopolymère produit par *Xanthomonas* (Becker et al., 1998). La gomme xanthane a été largement utilisée dans l'industrie alimentaire en raison de sa stabilité à la température, de sa compatibilité avec les

additifs alimentaires et de ses qualités rhéologiques pseudoplastiques (García-Ochoa et al., 2000). En outre, la gomme xanthane est également utilisée comme gélifiant et agent de séparation (floculant) pour le contrôle de la viscosité dans le secteur pétrolier, en tant que boue de forage épaississante (Becker et al., 1998). Ces dernières années, de nombreuses études pour appliquer la gomme xanthane dans les techniques d'ingénierie géotechnique en raison de sa grande efficacité de renforcement des sols et de son économie adaptée (M. Lee et al., 2022), la poudre de gomme xanthane commerciale utilisée dans cette étude est présentée dans la figure 3.17.



Figure 3. 17: Le biopolymère xanthane utilisée dans cette étude

### 3.4 Conclusion

Ce chapitre présente les détails des différentes séries de travaux expérimentaux réalisés dans le cadre de cette recherche, en utilisant l'essai de cisaillement direct, l'essai triaxial et l'essai de cisaillement simple dynamique pour étudier le comportement des différents type de sable renforcé par fibre d'un part et d'autre part traité par biopolymère. Le dispositif de cisaillement direct de Casagrande, le dispositif triaxial et le dispositif de cisaillement simple cyclique ont été détaillés, ainsi que les étapes de la procédure d'exécution des essais de cisaillement, suivies de la méthode de préparation des échantillons. Ensuite, les caractéristiques mécaniques du sol et le renforcement utilisé ont été présentés. Ce qui permet d'aller plus loin dans l'étude des paramètres qui ont une influence sur le comportement du sable étudié. Les chapitres suivants présenteront les travaux expérimentaux réalisés dans le cadre de cette thèse, en utilisant des fibres de renforcement et la gomme de Xanthane pour améliorer le comportement mécanique des sables.

# **CHAPITRE IV : COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN SABLE RENFORCE PAR DES FIBRES RECYCLEES**

---

Le quatrième chapitre présente la première série d'essais mécaniques réalisés en laboratoire. Ce chapitre traite du comportement d'un sol sableux (Sable de Zemmouri) à l'aide de l'essai de cisaillement direct de la boîte de Casagrande. L'objectif principal est d'étudier l'évolution du comportement de sable renforcée à l'état sec et humide en tenant compte de sa résistance et de ses caractéristiques mécaniques de cisaillement.

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'essais de cisaillement direct à la boîte réalisés sur le sable naturel de Zemmouri. Le sable a été renforcé par les fibres recyclées, réparties de manière aléatoire à deux densités relatives : un état modérément dense de  $D_r = 49\%$  et un état lâche de  $D_r = 25\%$ . L'étude permet de comparer les résultats obtenus lors d'essais réalisés sur des échantillons non renforcés en mode sec ( $W = 0\%$ ) et humide ( $W = 4\%$ , sous différentes contraintes de confinement vertical (50, 100 et 200 kPa). L'effet du renforcement sur le sable de Zemmouri avec des fibres recyclées de teneur variée ( $f_c = 0,2 ; 0,4; 0,6 \text{ et } 0,8\%$ ).

Les objectifs de ces essais comportent deux volets : examiner l'impact de la teneur en fibres, du confinement et de la densité relative sur la réponse mécanique du sable renforcé par des fibres, et déterminer la teneur optimale en fibres pour chaque état de densité.

## 4.2 Effet de la teneur en fibre

L'effet de la teneur en fibres sur le comportement mécanique du sable de Zemmouri est étudié dans cette étude. Dans les courbes ci-dessous, nous avons 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, 0,2, 0,4, 0,6 et 0,8 %) dans des spécimens non renforcés.

### 4.2.1 Échantillon lâche ( $D_r=25\%$ )

Dans cette étude, pour une densité relative proche ( $D_r = 25\%$ ), l'influence de la teneur en fibres sur l'évolution de la résistance au cisaillement et les limites de résistance (courbes intrinsèques) se stabilise. La figure 4.1a montre la variation de la relation résistance au cisaillement-déplacement horizontal d'un mélange sable-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 5 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-fibres, cependant que 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 0,2 et 0,4 %, la résistance maximale a été observée après 2,5 mm de déplacement horizontal ; cette évolution est significative pour la teneur en fibres de 0,4 %. De plus, une augmentation de la résistance au cisaillement résiduelle a été observée pour les

échantillons renforcés par des fibres.

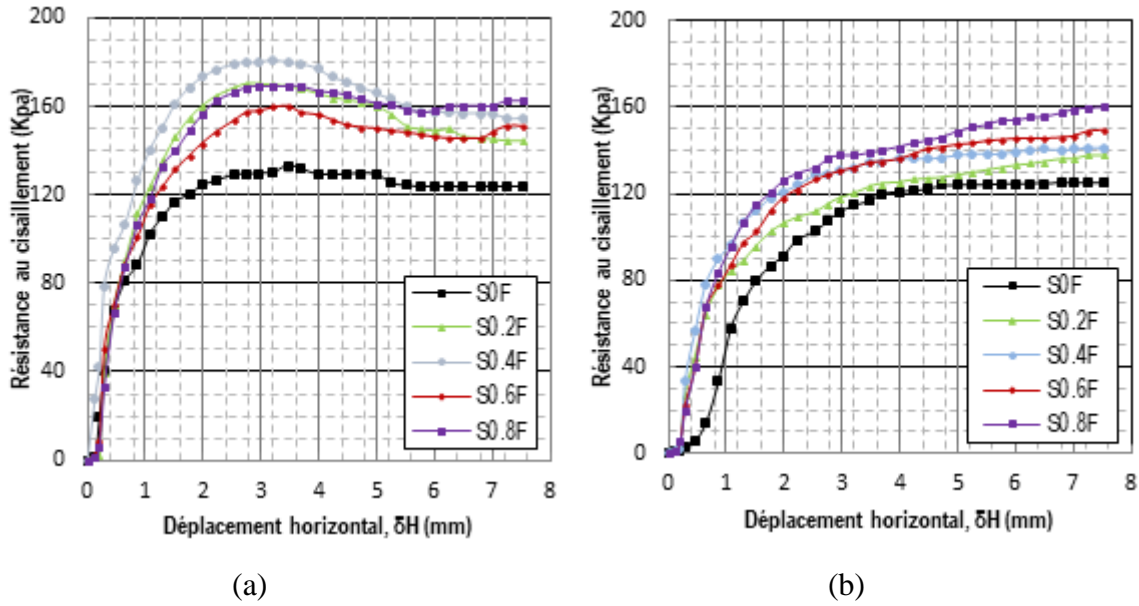


Figure 4. 1.1: Effet de la teneur en fibres sur la résistance au cisaillement avec une densité  $D_r=25\%$  (a)Sèche, (b) humide.

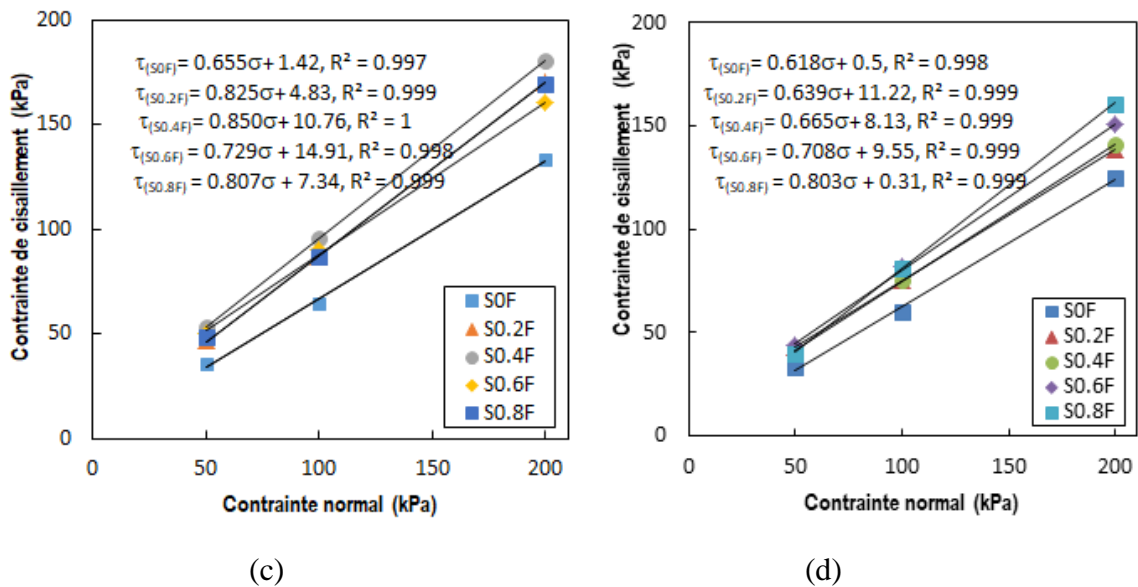


Figure 4.1.2: courbes intrinsèques du sable (c) sec et (d) humide

Les deux figures montrent une différence significative (figure 4.1a et 4.1b). La figure 4.1b présente la variation de la résistance au cisaillement du sable humide en fonction du déplacement horizontal ; la contrainte de cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres pour une même contrainte normale appliquée, ce qui représente pratiquement le même comportement. Les résultats indiquent que le renforcement avec les fibres recyclées permet d'améliorer la force (interlocking) des particules de sable avec une augmentation de la contrainte de cisaillement. En outre, l'amélioration de la résistance au cisaillement est essentiellement liée au mouvement des fibres et à leur interaction avec les particules de sable.

Les courbes intrinsèques présentées dans les figures 4.1c et 4.1d montrent que tous les échantillons renforcés présentent une résistance au cisaillement supérieure à celui du sable non renforcé. Pour le sable sec, les valeurs de la pente de l'angle de frottement pour des teneurs en fibres variées, à savoir 0,2 %, 0,4 %, 0,6 % et 0,8 %, étaient de 0,82, 0,85, 0,72 et 0,80. Par rapport à la figure 4.1 d, la pente de l'angle de frottement a varié à 0,63, 0,66, 0,70 et 0,80, respectivement, pour le sable ayant une teneur en eau de 4 %. La force intergranulaire 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 fibre 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 supporté 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 fibres.

#### **4.2.2 Sable moyennement dense ( $D_r = 49\%$ )**

Dans les courbes de contrainte de cisaillement-déplacement horizontal illustrées dans les figures 4.2a et 4.2b, sous une contrainte normale de 200 kPa à densité moyenne, les échantillons avec renforcement présentent une rigidité initiale légèrement plus élevée que les échantillons sans renforcement. En outre, on observe une augmentation de la résistance au cisaillement dans toutes les teneurs en fibres pour le sable sec. Ceci est expliqué par le fait que les fibres remplissent les vides dans la matrice. Il est constaté que la résistance de cisaillement au pic du sable renforcé par des fibres est plus élevée que celle du sable non renforcé à cause de l'augmentation de l'interaction fibre-sable, une observation similaire pour le sol sableux renforcé par des fibres de polypropylène est rapportée par (Benziane et al., 2019; Berkane et al., 2023).

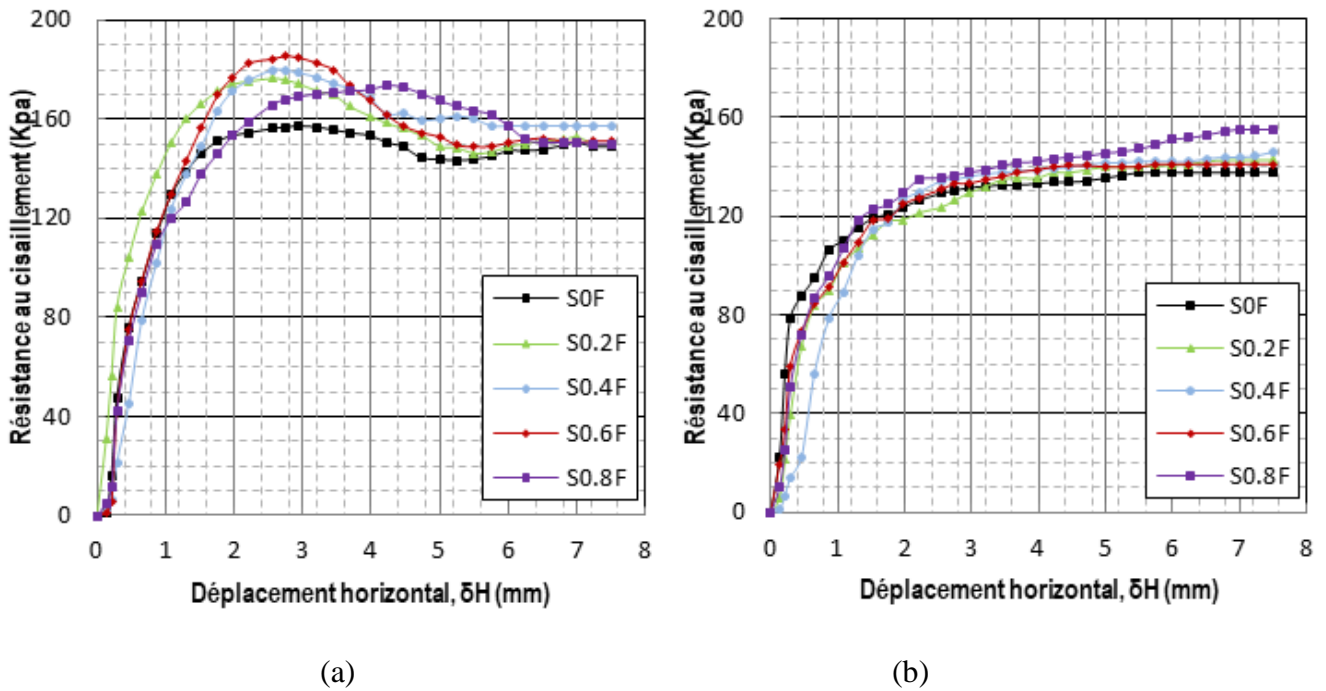


Figure 4.2.1: Effet de la teneur en fibres sur la résistance au cisaillement avec une densité  $D_r=49\%$  (a) Sèche, (b) humide.

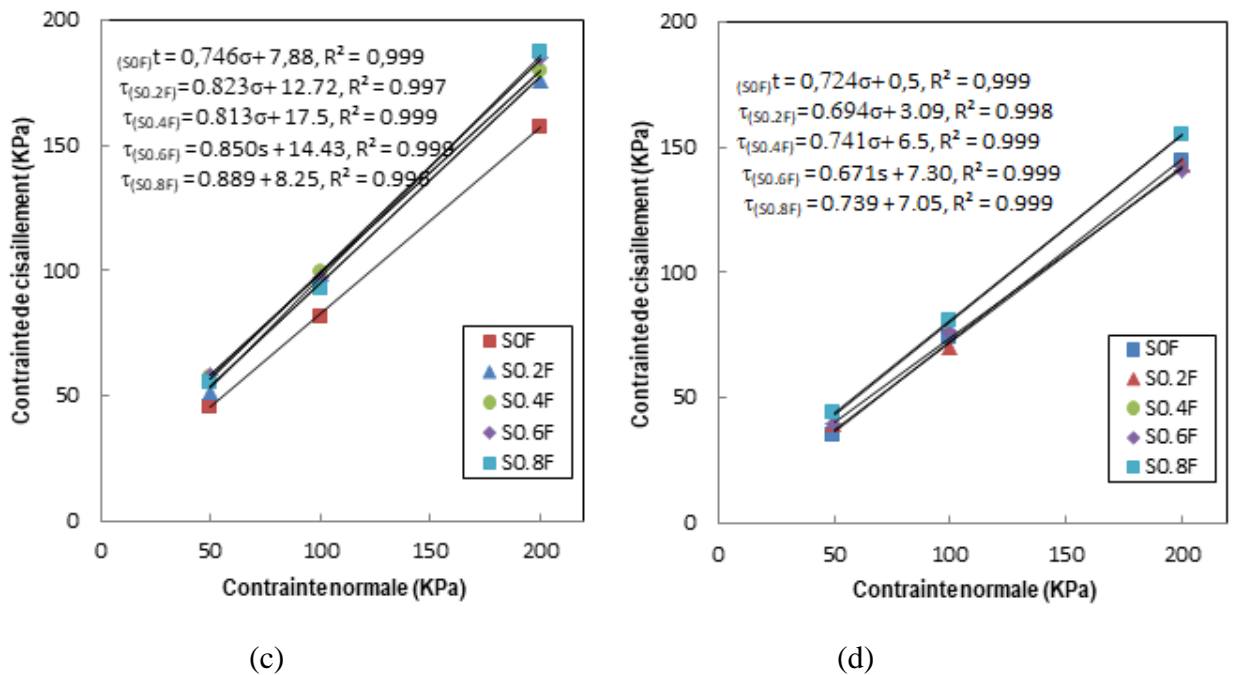


Figure 4.2.2: courbes intrinsèques du sable (c) sec et (d) humide

### 4.3 Effet de la teneur en fibre sur la cohésion et l'angle de frottement

#### 4.3.1 Échantillons lâches

Les enveloppes de rupture montrent les valeurs enregistrées pour chaque contrainte appliquée, comme le montrent les figures 4.1c, 4.1d, 4.2a et 4.2b de la section précédente. Dans le cas

d'un mélange de sable sec avec des fibres comme représenté dans

la figure 4.3, la cohésion et l'angle de frottement augmentent proportionnellement à la teneur en fibres. On observe une légère diminution de l'angle de frottement interne et une augmentation de la cohésion pour une teneur en fibres de 0,6 %, une diminution de la cohésion pour une teneur en fibres de 0,8 % et une augmentation de l'angle de frottement interne. En général, l'effet des fibres de recyclage est plus marquée sur la cohésion et l'angle de frottement interne. Cette observation a été également rapportée par (Alhassani, 2021; Manuel et al., 2021).

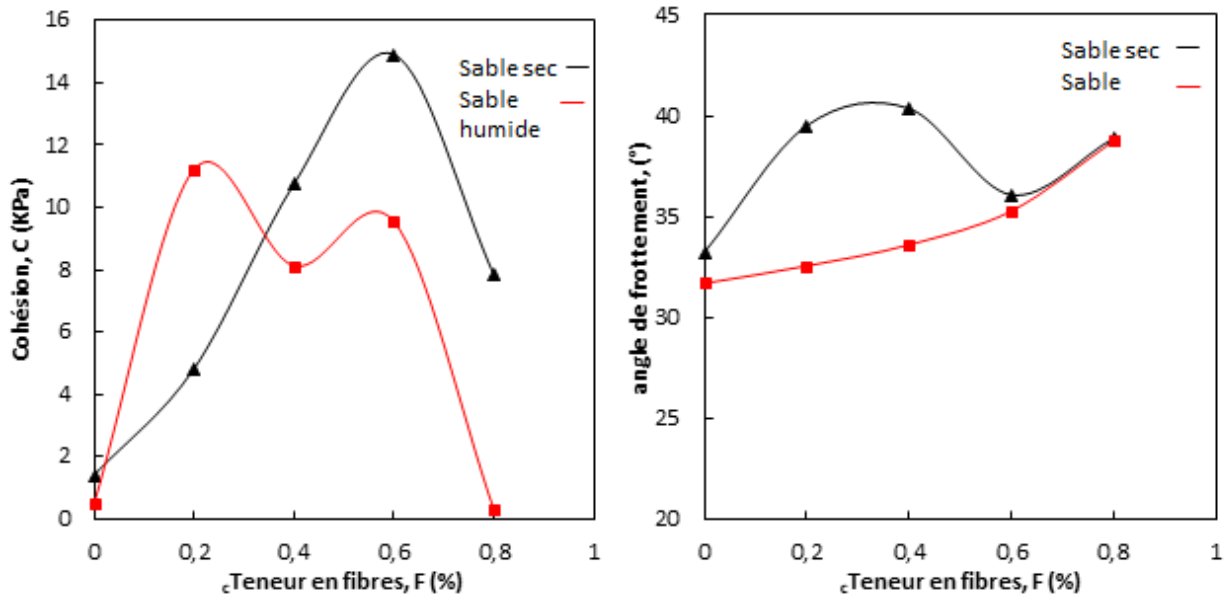


Figure 4. 2: Effet de la teneur en fibres du sable lâche sec et humide en fonction (a) la cohésion, (b) l'angle de frottement

### 4.3.2 Échantillons moyennement denses

Dans le cas des échantillons de sable moyennement dense, une augmentation de la cohésion et de l'angle de frottement interne est observée jusqu'à une teneur en fibres de 0,4 %, comme le montrent les figures 4.4a et 4.4b. Après ce point, la cohésion diminue et l'angle de frottement interne augmente jusqu'à 41,36°. Ce changement est expliqué par le développement du réseau de fibres et son interaction avec les particules de sable.

Les figures 4.4a et 4.4b montrent également une légère augmentation de la cohésion dans le sable humide, causée par l'amélioration de la résistance au cisaillement du sol liée aux fibres, comme le montre (Benziane et al., 2019). En outre, une variation de l'angle de frottement interne a été observée avec une augmentation de la teneur en fibres, ce qui correspond aux résultats d'Isazadeh-Khiav et al. (Isazadeh-Khiav et al., 2022).



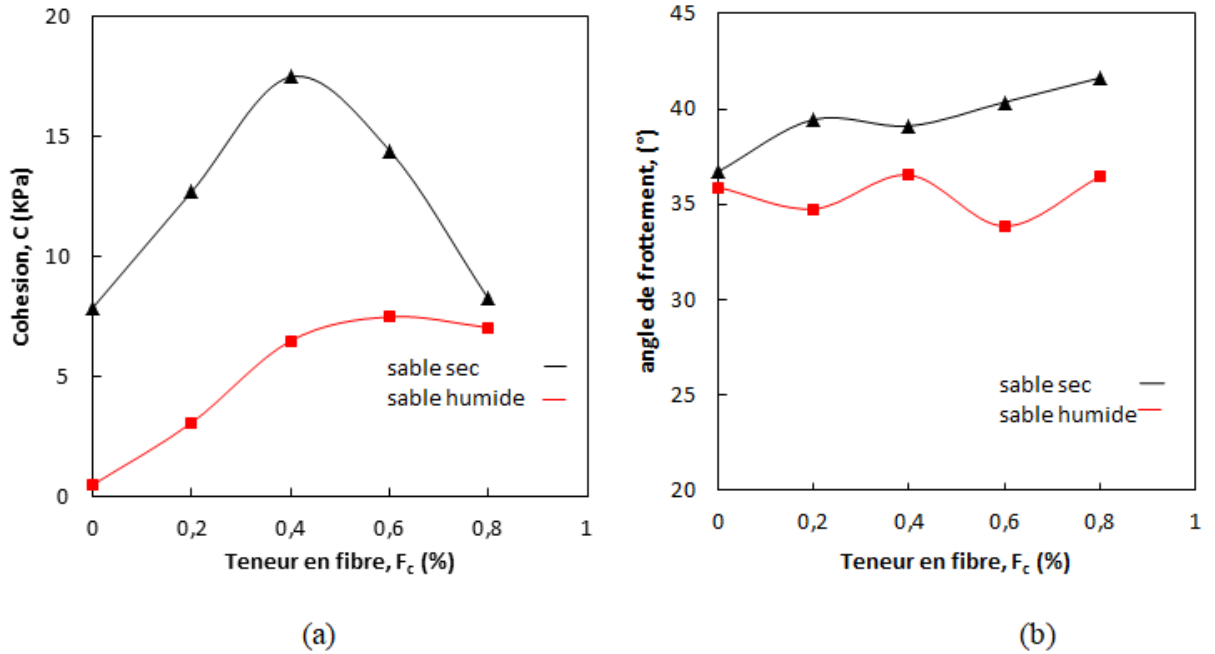


Figure 4. 3: Effet de la teneur en fibres sur la cohésion et l'angle de frottement du sable moyennement dense renforcé, sec et humide : (a) Cohésion, (b) Angle de frottement

#### 4.4 Effet de teneur en fibre sur la contractance et la dilatance

La figure 4.5a montre que le sol sableux a connu une augmentation de la variation de volume pendant le cisaillement (dilatation) lorsqu'on le compare aux sols sans fibres. Les sols avec fibres présentent une variation légèrement plus importante. Dans la figure 4.5b, on observe que la variation de volume a diminué (contraction) pour le sable humide dans le cas du sable non renforcé. Il a été également observé qu'une augmentation de la teneur en fibres augmente le comportement contractant de sable humide renforcés par des fibres, ces résultats sont similaire avec (Eldesouky et al., 2015).

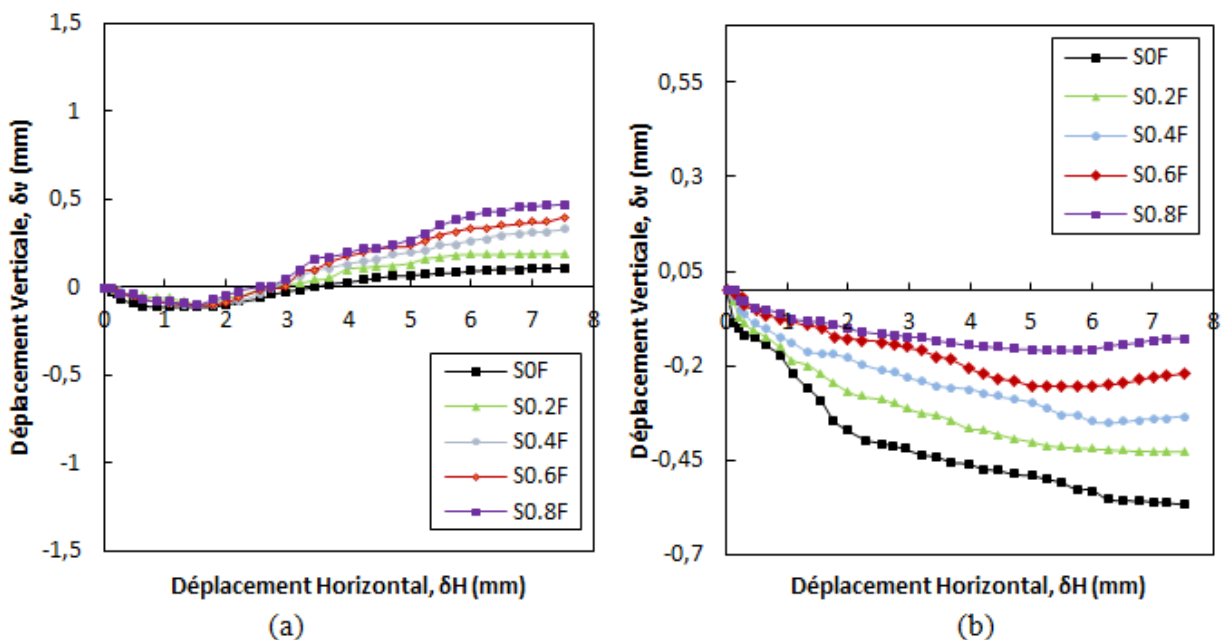


Figure 4. 4: Courbes de déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal pour des échantillons de sable lâche cisailés à 200 kPa, (a) sable sec, (b) sable humide.

La figure 4.6a présente le cas d'un sable sec moyennement dense, qui présente une augmentation de volume avec l'augmentation de la teneur en fibres (dilatation) ; la figure 4.6b montre que la contraction des échantillons augmente avec une valeur plus élevée de la densité du sable humide, ce qui se traduit par l'effet de la densité relative et de la teneur en fibres sur l'évolution du déplacement vertical, ces résultats sont conformes à ceux obtenus ( Falorca & Pinto, 2011; Aouali et al., 2019; Benziane et al., 2019; Berkane et al., 2023).

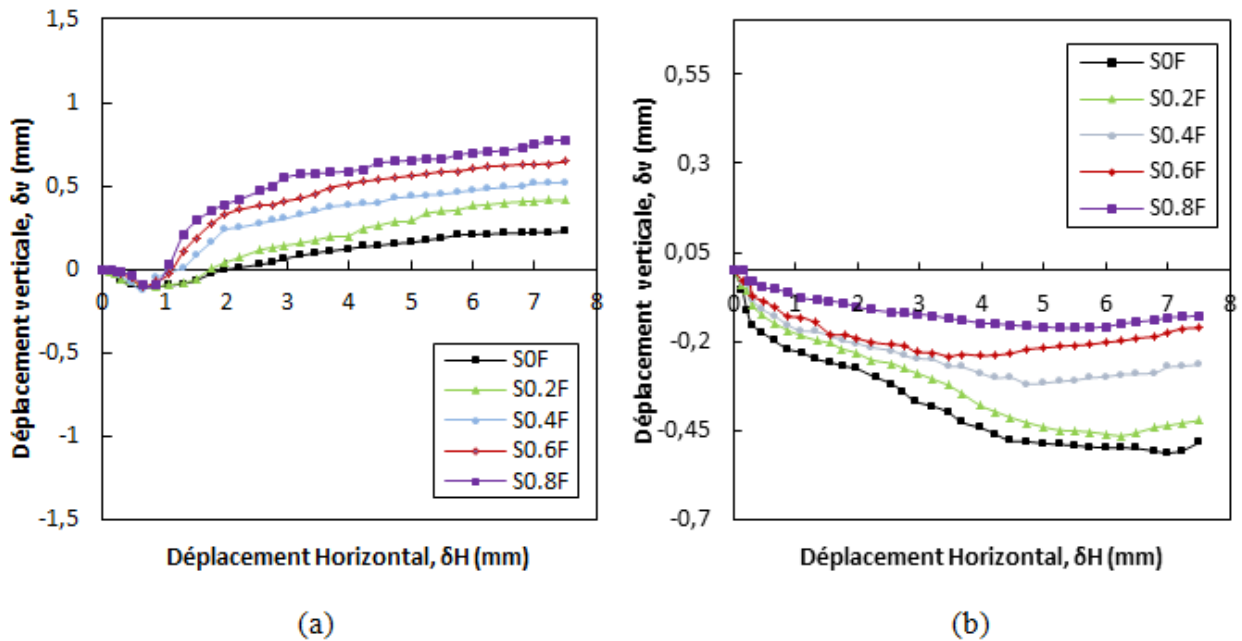


Figure 4. 5: Courbes de déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal pour des échantillons de sable moyennement dense cisailés à 200 kPa, (a) sable sec, (b) sable humide.

#### 4.5 Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que l'incorporation de fibres de plastic recyclées a contribué à l'amélioration de la résistance au cisaillement (cohésion et angle de frottement interne) du sable renforcé, par rapport au sable non renforcé. Les résultats obtenus sont compatibles avec des travaux antérieurs (Benessalah et al., 2016; Leyla Bouaricha, 2018).

- Dans le but de renforcer le potentiel des déchets (ressources de la biomasse) dans l'amélioration des sols, nous avons mené une étude expérimentale sur l'utilisation de fibres de déchets plastiques existantes en masse sur le comportement des sols sableux.
- Le renforcement des sols sableux avec des fibres de plastique recyclées discrètes permet d'une part de réduire l'impact des déchets plastiques solides sur l'environnement et d'autre part d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sables traités et donc la

durabilité du projet.

- La teneur en fibres de recyclage optimale pour atteindre la résistance maximale au cisaillement du sable de Zemouri est de 0,4 % et 0,6 % pour une densité relative de 25 % et 49 %, respectivement, dans des conditions sèches.
- Les résultats des essais montrent que les propriétés mécaniques du sol renforcé par des fibres sont améliorées de manière significative par la présence de fibres recyclées, ce qui entraîne une augmentation des valeurs maximales de cohésion et d'angle de frottement pour toutes les densités étudiées.

# **CHAPITRE V : COMPORTEMENT MECANIQUE DES SABLES TRAITÉ PAR BIOPOLYMER ET RENFORCER PAR DES FIBRES**

---

L'objectif de ce chapitre est de présenter de manière générale les principales remarques et observations sur le comportement mécanique des sables traité par biopolymère et renforcés par des fibres de polypropylène, lors d'essais de compression simple à l'aide d'un appareil triaxial, L'étude est effectuée principalement en comparaison avec le comportement mécanique des sols sableux non renforcés.

## 5.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus sur l'influence du type traitement par le biopolymère avec et sans renforcement par fibre de polypropylène sur la résistance à la compression simple du sable de Oued Souf et sable de El Hadjeb. Les essais de compression ont été réalisés sur l'appareil triaxial présenté au chapitre 3. Les échantillons ont été préparés avec une teneur en eau ( $W = 10\%$ ) avec une temps de cure de (7, 14 et 28jours) pour une température entre 22 et 25°C comme montre dans la figure 5.1, en utilisant la méthode de préparation basé sur la méthode de mélange de biopolymère et le sable à sec, la méthode à sec est plus efficace que la méthode humide pour renforcer le matériau (Velde & Kiekens, 2001), Les échantillons ont été compressés sous vitesse de 0.5 mm/min.



Figure 5. 1: Le séchage des échantillons à l'aire libre

## 5.2 Résistance à la compression non confinée du sable de dune traité à la gomme de xanthane

Des essais de compression non confinée ont été réalisés sur les échantillons S1 et S2 traités à la gomme xanthane en considérant différents âges de durcissement 7, 14 et 28 jours. Des courbes typiques de résistance et de déformation de l'UCS sont présentées à la figure 5.2. La résistance à la déformation des échantillons S1 et S2 non traités est respectivement mesurée entre des valeurs de 40 kPa et de 32 kPa. Comme le montre la figure 5.2, lorsque du xanthane est ajouté à des pourcentages variants entre 0,5, 1 et 2 %, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en xanthane et du temps de durcissement. Pour les échantillons S1 mélangés à 0,5 % de XG, la résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours est respectivement de 871.793, 1232.792 et 1363.415 kPa. Ces résultats ont été rapportés dans plusieurs études présentant l'efficacité de l'utilisation du biopolymère pour améliorer les propriétés mécaniques du sol (Bagheri et al., 2023; Chang et al., 2015a; Kwon et al., 2019;

Qureshi et al., 2017). De la figure 5.2(b) et (c), nous avons montré que la gomme xanthane améliore la résistance à la compression pour différents teneurs et augmente la déformation axiale de la rupture à l'écroutissage. L'augmentation de la résistance à la compression est due à la capacité de la gomme xanthane à lier les particules de sable, ce qui permet d'obtenir une meilleure cohésion. La formation d'une matrice cohésive, qui résiste de façon durable aux charges de compression, a entraîné une augmentation de la résistance. On a également observé une augmentation de la résistance à la compression après 28 jours de cure. Le pic de contrainte augmente avec la teneur en gomme xanthane, ce qui indique une augmentation de la résistance à la compression ; des résultats similaires ont été cités par (Chang et al., 2020; S. Lee et al., 2019; Wang et al., 2021).

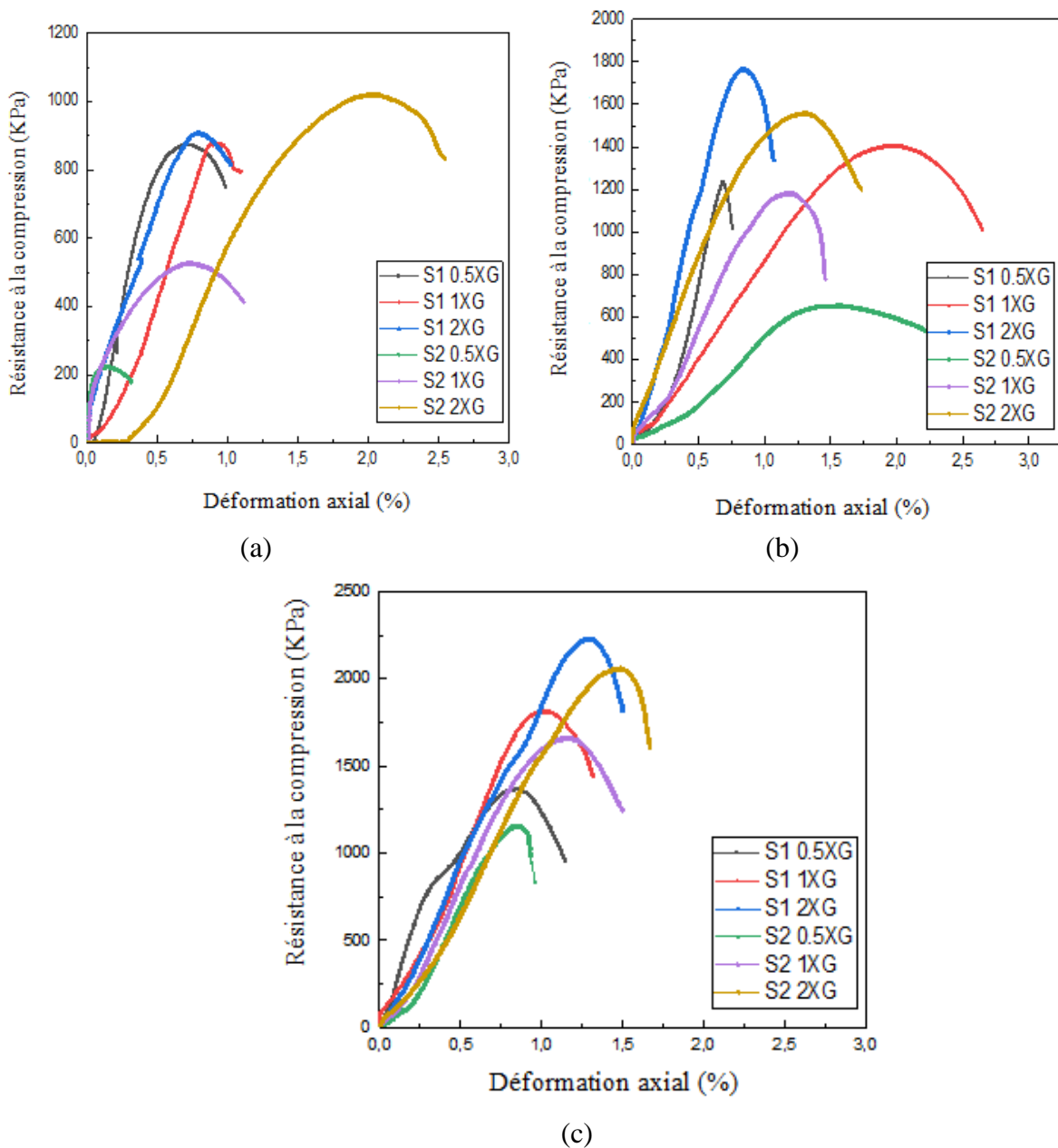


Figure 5. 2: Résistance à la compression non confinée du sable traité avec la gomme xanthane, (a) 7jours, (b) 14jours et (c) 28jours

### 5.3 Effet de la gomme xanthane traitée des sables de dune sur l'UCS<sub>max</sub>

Les résultats de la résistance maximale à la compression du sable traité avec le biopolymère gomme xanthane sont présentés dans la figure 5.3. Les résultats montrent que pour un temps de cure de 28 jours, l'ajout de 2% de XG aux échantillons de sol S1 conduit à une augmentation d'environ 55,58% de la résistance maximale à la compression, et d'environ 64% pour le sol S2 mélangé avec 2% de XG. Il est à noter que, les effets de la gomme xanthane et de l'âge de cure sont significatifs sur les deux types de sables ; pour une même concentration de gomme xanthane, le sable grossier S1 a été plus résistant que le sable fin S2, ces résultats s'expliquent par l'important volume de vides que contient le sable grossier S1. Par conséquent, le biopolymère de la gomme xanthane occupe le vide entre les grains de sable. Contrairement au sable fin, il y a une faible résistance car la morphologie est différente de celle du sable grossier, alors dans ce cas, la gomme xanthane permet de remplir le même pore. Comme le montre le test SEM, ces résultats confirment les conclusions présentées par (Chang et al., 2015a; S. Lee et al., 2019; Ma, 2023).

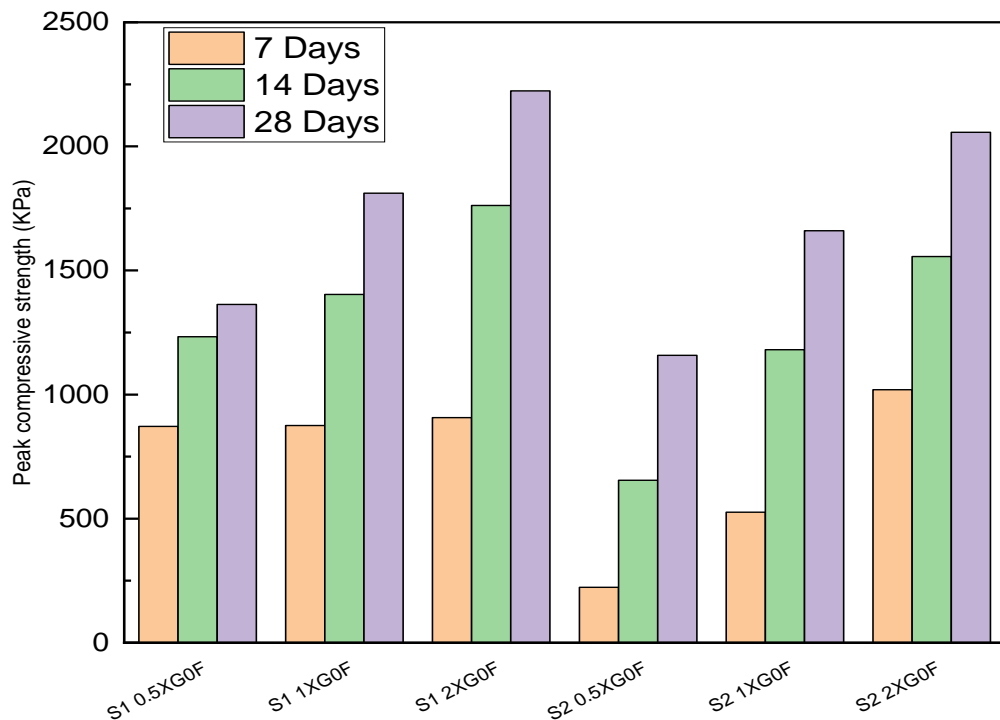
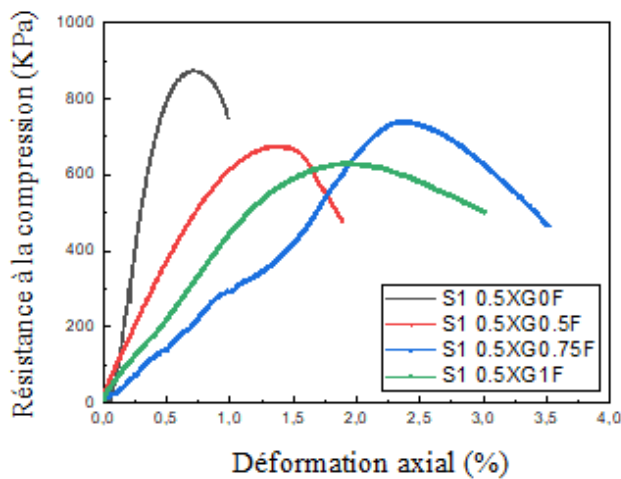


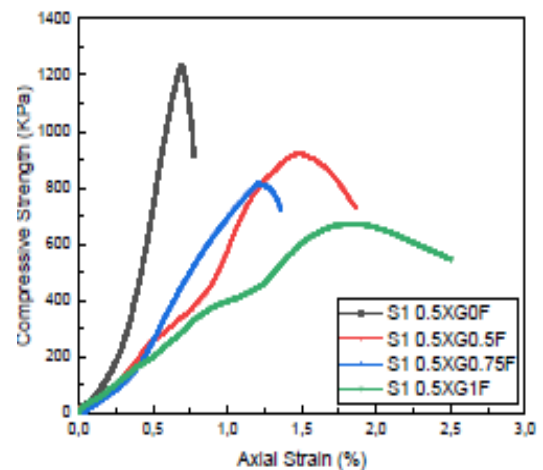
Figure 5. 3: Influence de la teneur en XG sur la résistance maximale des sables pour différents temps de durcissement

#### 5.4 Effet de la teneur en fibres sur la résistance à la compression non confinée du sable traité à la gomme xanthane

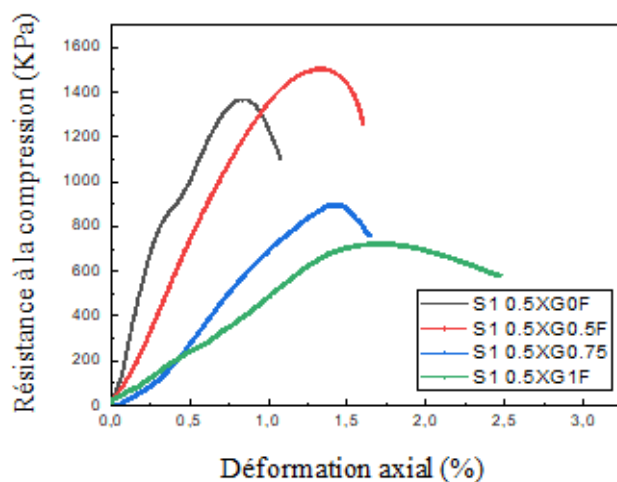
La figure 5.4 montre la résistance à la compression d'échantillons de sable traité non renforcé et de sable traité renforcé avec 0,5 % de gomme xanthane. Le résultat de l'UCS pour différentes teneurs en fibres ( $F_c = 0, 0,5, 0,75$  et  $1$  %) et des périodes de cure de 7, 14 et 28 jours respectivement est représenté sur la figure. Il est évident que dans le cas du sable S1 renforcé de fibres, l'incorporation de fibres diminue initialement la résistance pendant les périodes de cure de 7 et 14 jours, puis le sol augmente sa résistance et réduit sa fragilité pendant la période de cure de 28 jours. Comme le montrent les figures 5.4 (d, e et f), les résultats indiquent également que la ductilité de tous les échantillons augmente directement avec l'ajout de fibres lorsque la période de durcissement est comprise entre 7 et 14 jours et qu'elle diminue à 28 jours.



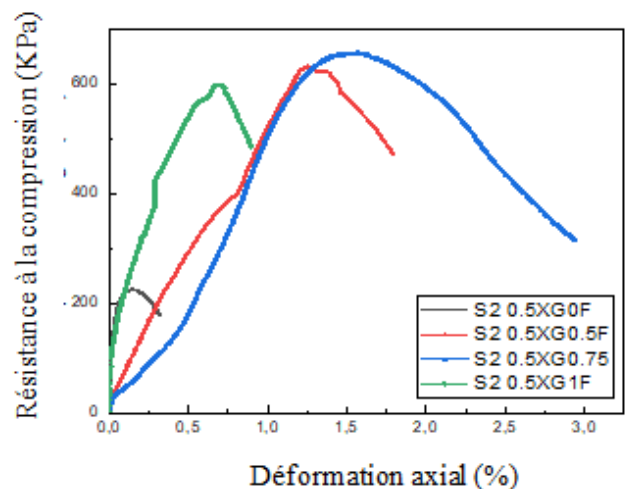
(a) S1 7 Jours



(b) S1 14 Jours



(c) S1 28 Jours



(d) S2 7 Jours



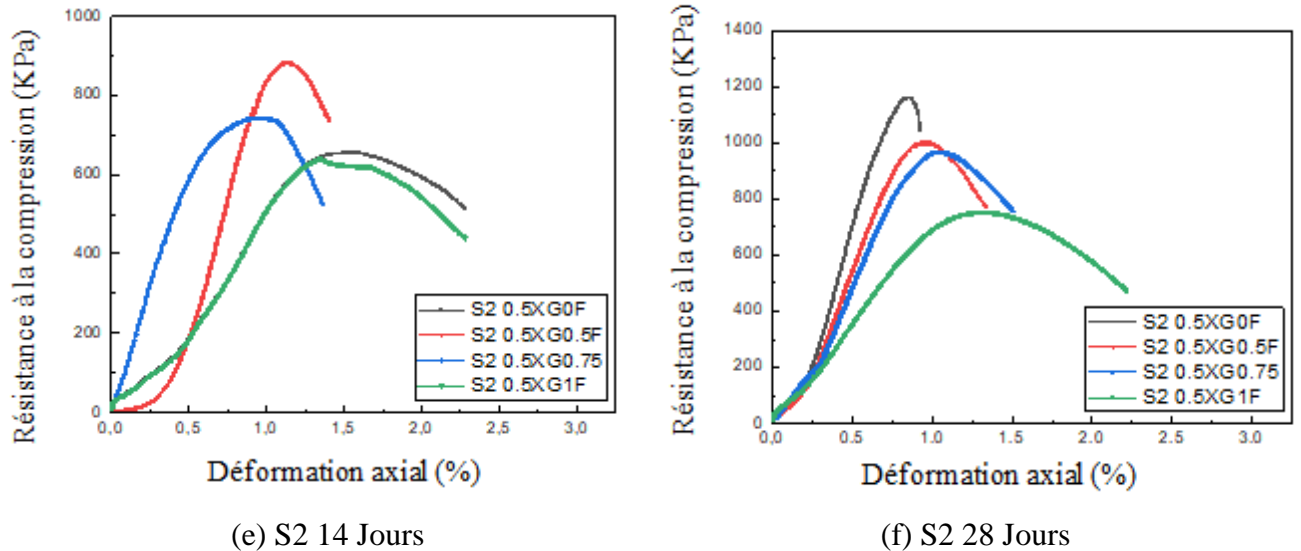


Figure 5. 4: Effet de la teneur en fibres sur le sable traité à la gomme xanthane

## 5.5 Résistance maximale à la compression pour tous les échantillons

### 5.5.1 Variation de la résistance maximale à la compression du sable fin traité avec différentes teneurs en XG et en fibres

La figure 5.5 montre l'évolution de la résistance maximale à la compression du sable fin (S2) traité avec la gomme xanthane à différentes concentrations et renforcé avec différents teneurs en fibres, avec différentes périodes de cure : 7, 14 et 28 jours. Les résultats montrent que la résistance maximale à la compression augmente avec le temps et la concentration de biopolymère. Cela correspond aux résultats obtenus par (Sujatha, 2021). Les biopolymères présentent la plus forte augmentation de résistance et se solidifient au fur et à mesure qu'ils sèchent. En ce qui concerne l'effet combiné de la fibre sur le sable traité, il a été montré après 7 jours de durcissement que la résistance à la compression maximale se manifeste pour le sable traité avec la gomme xanthane (XG), où chaque pourcentage de fibre contribue à diminuer le pic de résistance à la compression du sable traité avec la gomme xanthane (S2).

Pour cette raison, ce mélange a été écarté pour les prochaines recherches. En effet, la gomme xanthane a un effet important sur l'amélioration de la résistance et les fibres sur la ductilité du mélange, mais lorsque la teneur en fibres est supérieure à 0,5 %, la teneur élevée en fibres ne crée pas de cohérence lorsqu'elles sont mélangées à la gomme xanthane, le pic de résistance diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Toutefois, il est possible qu'une concentration plus élevée de fibres produise un impact plus important sur la résistance à la compression, comme le mentionné (Gu & Chen, 2022).

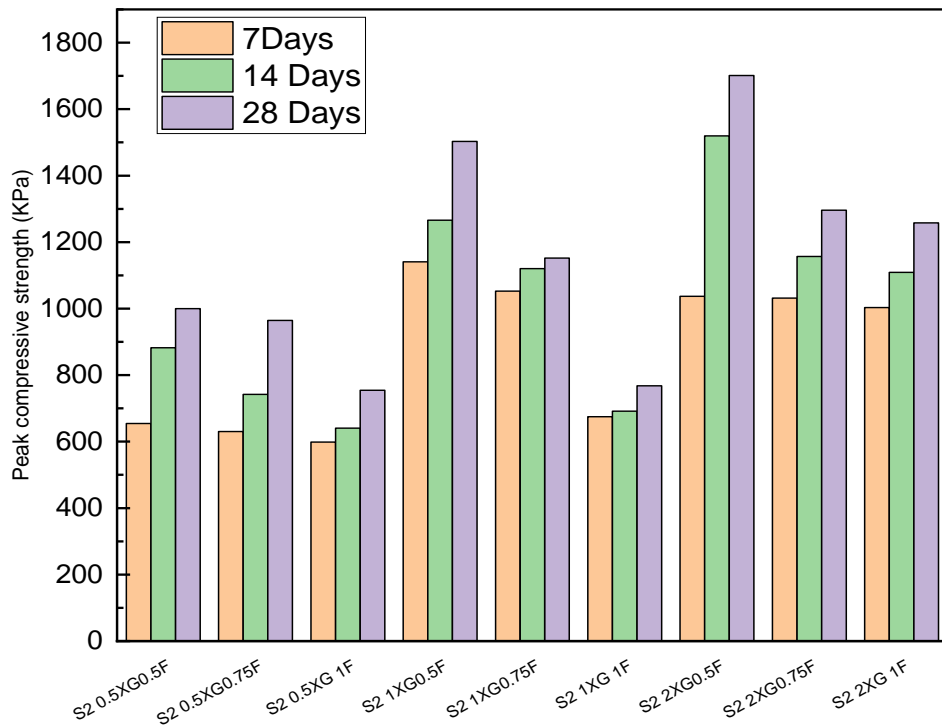


Figure 5. 5: Influence de la teneur en fibres et en XG sur la résistance au pic avec différentes périodes de durcissement

### 5.5.2 Effet de la longueur des fibres et de la teneur en XG sur la résistance au pic du sable fin

La résistance maximale du sable fin traité avec une teneur constante en XG et renforcé avec deux longueurs de fibres différentes, la longueur des fibres étant de 6 mm et de 12 mm, est illustrée dans la figure 5.6. La résistance maximale du sable traité (S2) avec 1% de XG et renforcé avec des fibres a augmenté initialement à 1500,1 kPa et a ensuite diminué avec une augmentation de la longueur des fibres de polypropylène à différents temps de cure. La résistance maximale a atteint son niveau le plus élevé à une longueur de fibre de 6 mm pour 1 % de gomme xanthane et 0,5 % de fibre avec un temps de cure de 28 jours, ce qui représente la résistance maximale. Par contre, la résistance maximale avec une longueur de fibre de 12 mm est inférieure à la résistance maximale pour une longueur de fibre de 6 mm, en raison de la teneur en fibres plus élevée et des pores plus nombreux, comme le montre l'image de la microstructure (figure 5.6). Dans ces conditions, la résistance maximale diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres et de la longueur des fibres.

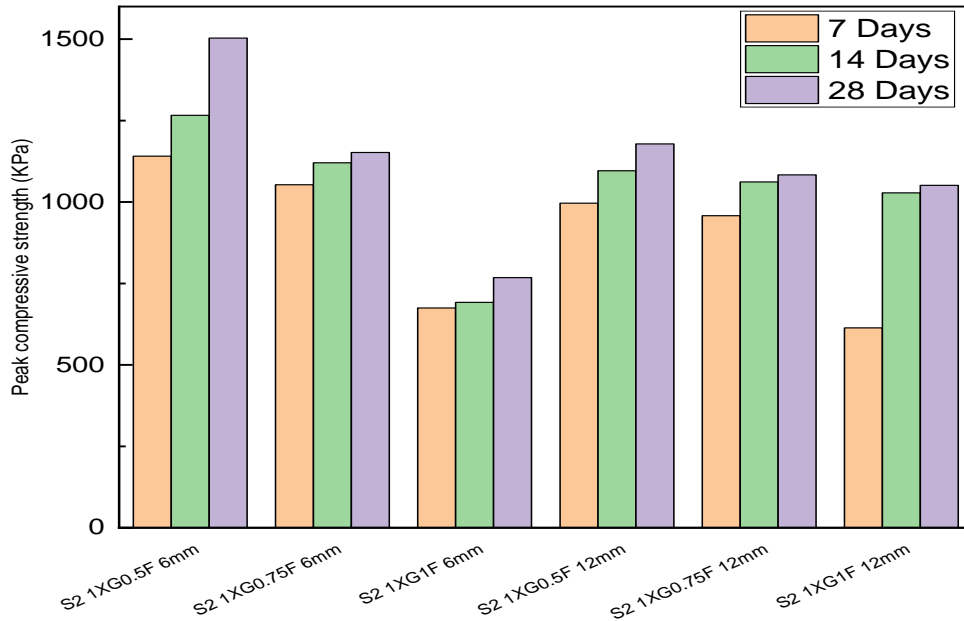


Figure 5. 6: Effet de la longueur des fibres sur la résistance à la compression du pic

#### Effet de la gomme xanthane et de la teneur en fibres sur $E_{50}$ avec différents temps de cure

##### 5.5.3 Effet de la teneur en XG sur $E_{50}$ avec différents temps de cure

Les figures 5.7a et 5.7b montrent le comportement du sable traité avec 0,5 %, 1 % et 2 % de gomme xanthane pour différentes périodes de cure. Les résultats montrent un impact significatif du traitement à la gomme xanthane sur le module sécant, ce dernier augmentant au fur et à mesure que la teneur en gomme xanthane augmente. Cela renforce le sol stabilisé en raison de l'hydratation des hydrogels. Néanmoins, avec le temps, la déshydratation des hydrogels provoque l'agglomération des particules du sol, ce qui contribue à l'augmentation du  $q_u$  et du  $E_{50}$ . Ce résultat est conforme aux études précédentes ([Chang et al., 2015a](#); [Qureshi et al., 2017](#)).

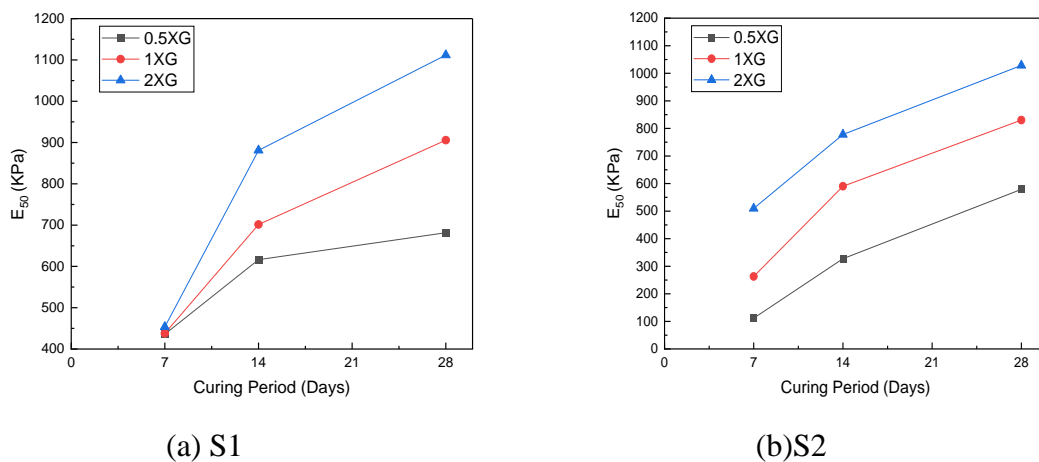


Figure 5. 7: Effet de la teneur en gomme xanthane sur le module  $E_{50}$  avec différents temps de durcissement

### 5.5.4 Effet de la teneur en fibres et de la gomme xanthane sur $E_{50}$ avec différents temps de cure

Les figures 5.8a, 5.8b et 5.8c présentent les résultats de la biostabilisation avec XG. Lorsque 0,5 % de fibres et 2 % de XG ont été mélangés, le module sécant a augmenté avec le temps de durcissement, pour atteindre un  $E_{50}$  maximal de 850,655 KPa. Cependant, le module d'Young sécant du sable traité avec des fibres ajoutées a diminué quand la teneur en fibres a augmenté. Il est important de noter que si la teneur en fibres est trop élevée, il peut se produire une agglomération, ce qui entraîne une teneur irrégulière en XG et une diminution de la résistance.

Une comparaison entre les figures 5.8a et 5.8d pour un mélange de sable traité avec 0,5 % de XG et renforcé avec différents pourcentages de fibres montre que le renforcement avec des fibres de polypropylène est plus efficace lorsque le sol a un volume de vide minimal. Néanmoins, on observe également que les fibres ont tendance à augmenter le volume du mélange. Par conséquent, les résultats confirment que pour les échantillons de sable fin renforcés avec 1% de fibres de PP, la résistance UCS reste proche pour toutes les périodes de durcissement.

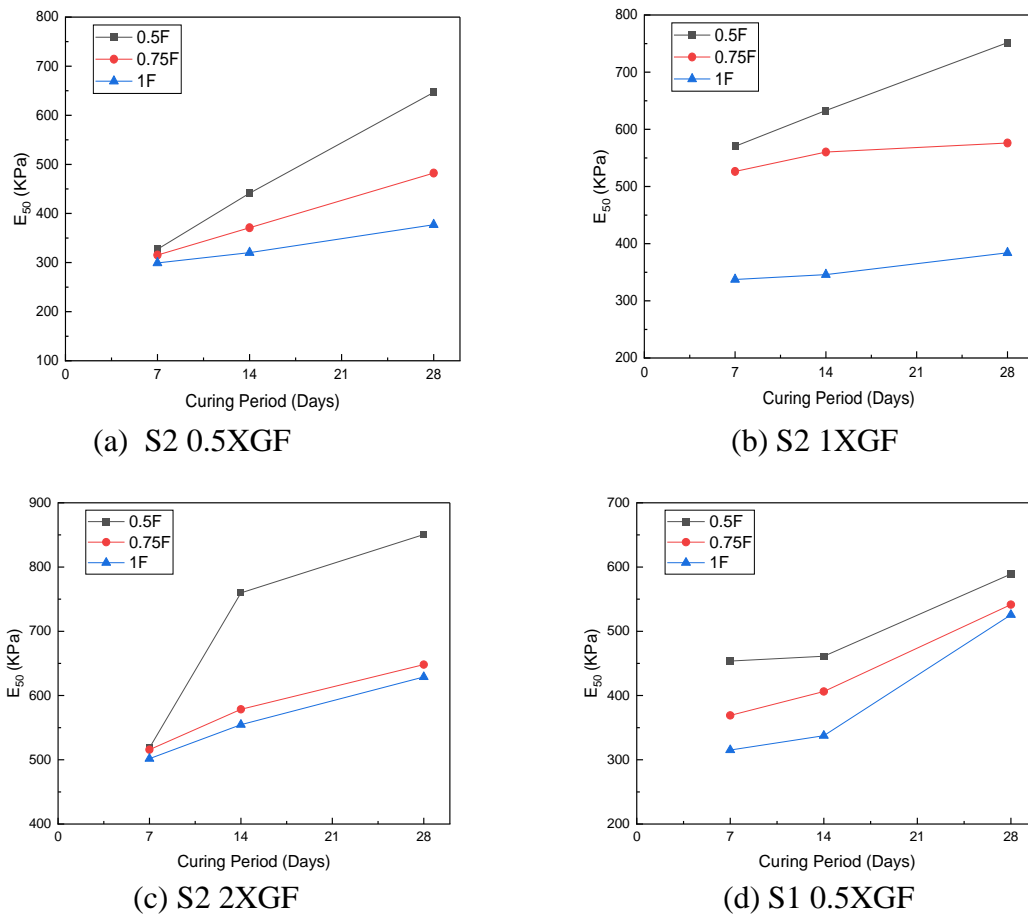


Figure 5. 8: Effet de la teneur en fibres et du XG sur le module  $E_{50}$  avec différents temps de cure

## 5.6 Structure microscopique du sable de dune traité par un mélange de XG et de fibres

Les figures 5.9(a), (b), (c) et (d) montrent des microscopies de sable de dune traité avec de la gomme xanthane et renforcé avec des fibres de PP. Les images MEB montrent que l'ajout de fibres et de gomme xanthane améliore la microstructure du sable. La combinaison des fibres et de la gomme xanthane forme un réseau tridimensionnel qui lie les particules de sable entre elles, permettant ainsi de réduire les vides entre elles, comme le constatent de manière similaire (Dehghan et al., 2019). Cette réduction des vides donne une microstructure plus dense et plus cohésive, ce qui améliore les performances mécaniques du sable.

L'amélioration de la microstructure du sable résulte de plusieurs facteurs. Tout d'abord, les fibres jouent un rôle de renforcement, empêchant les particules de sable de se déplacer les unes par rapport aux autres. Ensuite, la gomme xanthane joue le rôle le liant (Chang et al., 2015b), contribuant à la cohésion des particules de sable. Enfin, la formation d'un réseau tridimensionnel entre les particules de sable, les fibres et les molécules de gomme xanthane entraîne une répartition plus uniforme de la contrainte dans la masse de sable.

La teneur en fibres et leur répartition influencent la distribution et l'emplacement de la formation de la gomme xanthane. Dans les mêmes conditions d'essai, une teneur en fibres plus élevée ou une longueur de fibres plus importante entraîne une réduction de la formation de gomme xanthane à la surface des fibres, ce qui réduit la résistance à la compression.

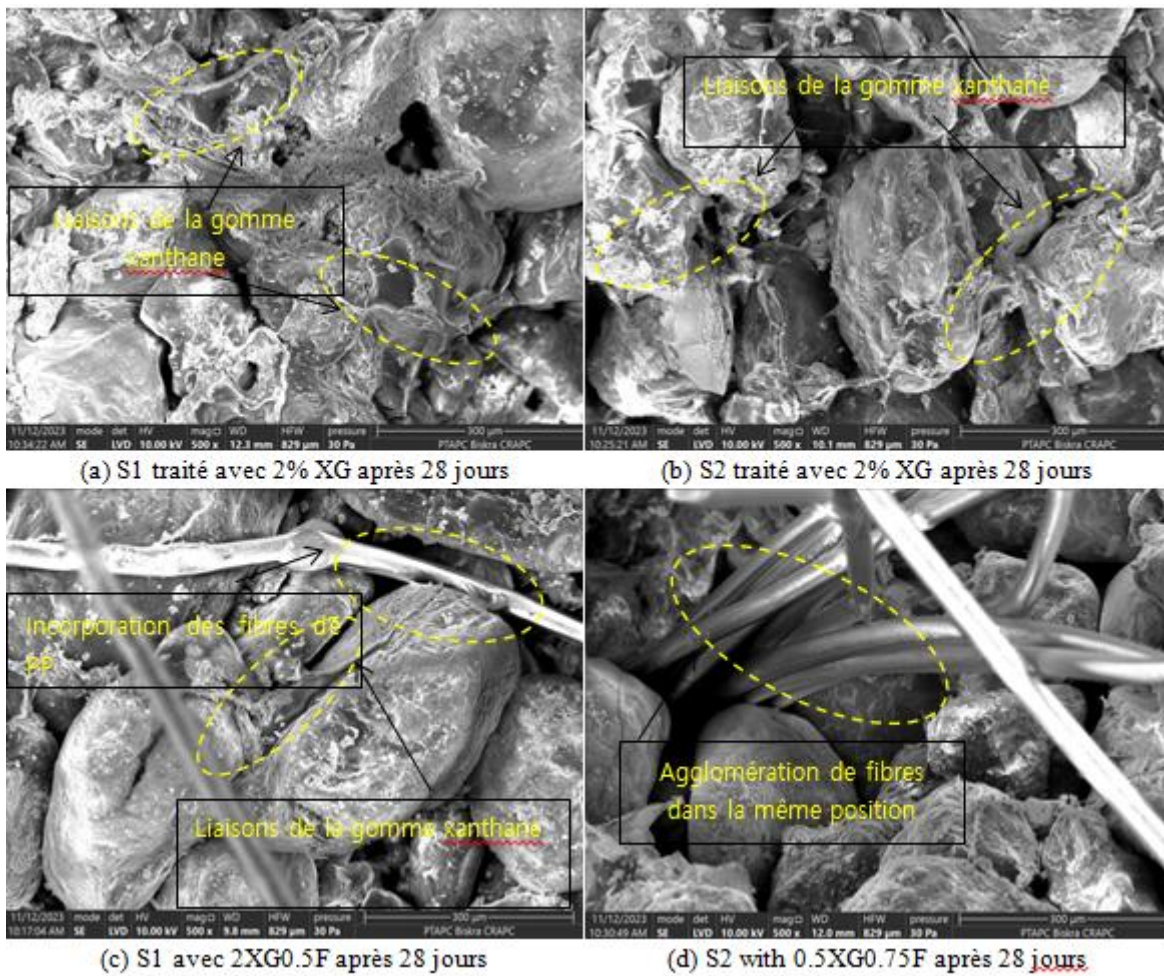


Figure 5. 9: Microstructure du sable traité par la gomme xanthane et renforcé par des fibres

## 5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats d'essais de compression triaxiaux non confinée sur deux sables de dune traité par le biopolymère XG et renforcée par les fibres de PP ont été présentés. Les résultats obtenus sont présentés en termes de résistance à la compression et du module sécant.

- L'ajout de gomme xanthane (XG) à un sol sableux augmente sa ductilité, c'est-à-dire sa capacité à se déformer sous l'effet d'une contrainte plus importante. Dans ce contexte, cette amélioration est directement proportionnelle à la concentration de XG.
- Le renforcement d'un sol avec la gomme xanthane (XG) entraîne une légère augmentation de la résistance et de la rigidité. Cette amélioration se manifeste uniquement lorsque la durée de cure est supérieure à 7 jours et que la teneur en XG est supérieure à 0,5 %.
- Au cours des 7 premiers jours du processus de traitement, la bio-stabilisation présente un impact limité en raison de son potentiel de dégradation de la qualité. Cette dégradation est liée à l'humidification partielle des hydrogels.
- Le renforcement par des fibres de PP produit un effet négatif sur le sable grossier en général et sur le sable fin en particulier avec le même dosage de XG (0,5 %), c'est-à-dire que la présence de fibres à une teneur élevée crée plus de vides qui augmente le volume de tout le mélange, ce qui a une influence sur la réduction de la résistance.

# **CHAPITRES VI : COMPORTEMENT MONOTONE ET CYCLIQUE DE SABLE DE DUNDE RENFORCE PAR FIBRE DE PP**

---

Ce chapitre présente une étude expérimentale de comportement monotone et cyclique de sable de Djamaa renforcé par les fibres de PP sous une contrainte appliquée de 50, 100 et 200KPa



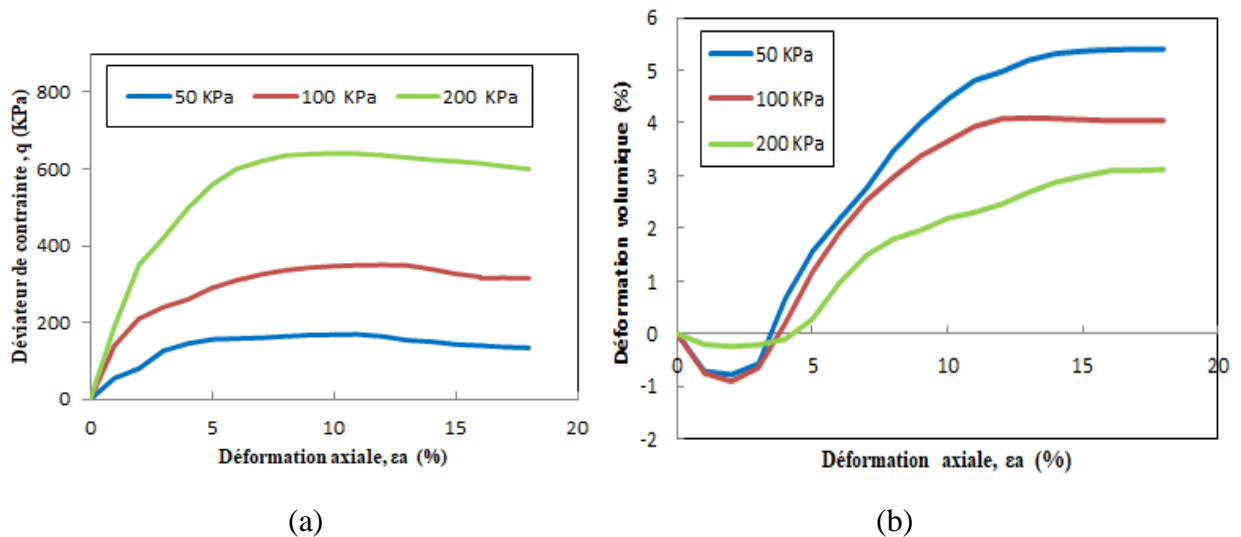
## 6.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus pour évaluer l'influence du teneur en fibre et de biopolymère xanthane sur la réponse monotone drainée du sable de dune de Djamaa. Les essais de compression monotone drainée ont été réalisés à l'aide de l'appareil triaxial présenté au chapitre 3. Les échantillons ont été préparés à un état de densité relative (60 %) en utilisant la méthode de préparation par damage humide de Lade, les mélanges effectués avec une teneur en eau de 10%. Tous les échantillons ont été consolidés sous trois contraintes de confinement de 50, 100 et 200 KPa.

Ce chapitre traitera également de l'effet de la contrainte de confinement et de la teneur en fibre de PP sur le comportement du sol renforcé. Nous commencerons par présenter les résultats des essais réalisés sur le sable non renforcé, puis les résultats des essais réalisés sur le sable renforcé.

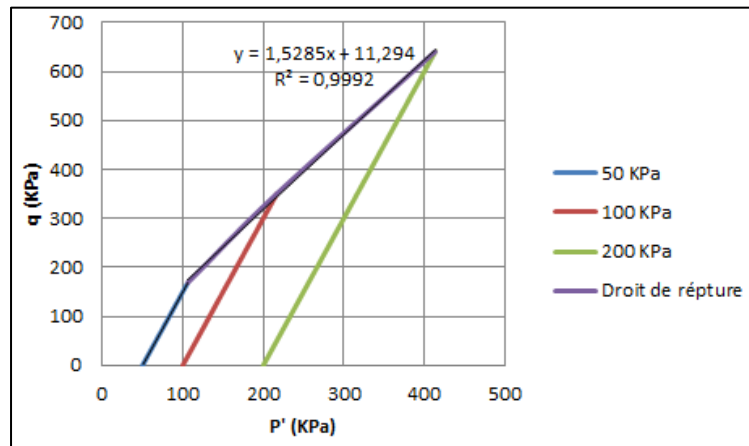
## 6.2 Comportement mécanique d'un sable non renforcé

Dans cette partie, notre étude se concentre sur l'impact de la pression de confinement. La figure 6.1 présente les courbes de réponse monotone drainées d'échantillons de sable de Djamaa non renforcé préparés par la méthode de damage humide avec une teneur initial de 8%, illustrant le déviateur de contrainte ( $q$ ) et les déformations volumiques en fonction de la déformation axiale ( $\epsilon_a$ ). Ainsi que les chemins de contrainte, la figure indique que la résistance du sol augmente avec l'augmentation de la contrainte de confinement (figure 6.1a).



En général, le sable se comporte en suivant deux phases (dilatation et contraction). La figure 6.1b montre l'évolution de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale du sable non traité. Au départ, on observe un comportement de contraction caractérisé par une diminution du déplacement vertical avec une augmentation du déplacement horizontal. Cette contraction est due au réarrangement et à l'enchevêtrement des grains.

La figure 6.1c présente les chemins de contrainte d'un sable non traité. On remarque que la contrainte effective moyenne augmente avec l'augmentation des contraintes de consolidation.

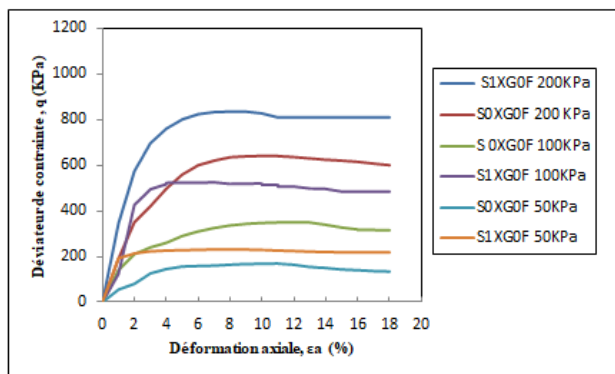


(c)

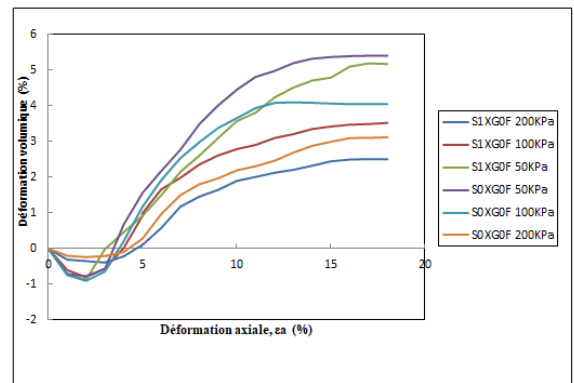
Figure 6. 1: Comportement monotone drainé du sable de Djamaa non renforcé, **(a)** courbes déviateur contrainte vs déformation axiale obtenue à partir d'essais triaxiaux CD **(b)** Courbes de déformation volumique vs déformation axiale obtenue à partir d'essais triaxiaux CD, **(c)** chemins de contraintes

### 6.3 Comportement mécanique d'un sable traité avec le biopolymère

La figure 6.2a présente les résultats des essais triaxiaux monotones de type drainé sur le sable de Djamaa traité avec 1% de la gomme de xanthane, l'ajout de la gomme de xanthane augmente le déviateur de contrainte du mélange sable-biopolymère. Cette augmentation résulte du rôle de biopolymère de remplit les vides et crée un lien entre les particules des sables, cet effet est clair dans l'augmentation de diminue la dilatance de mélange sable-biopolymer comme montre la figure 6.2b.

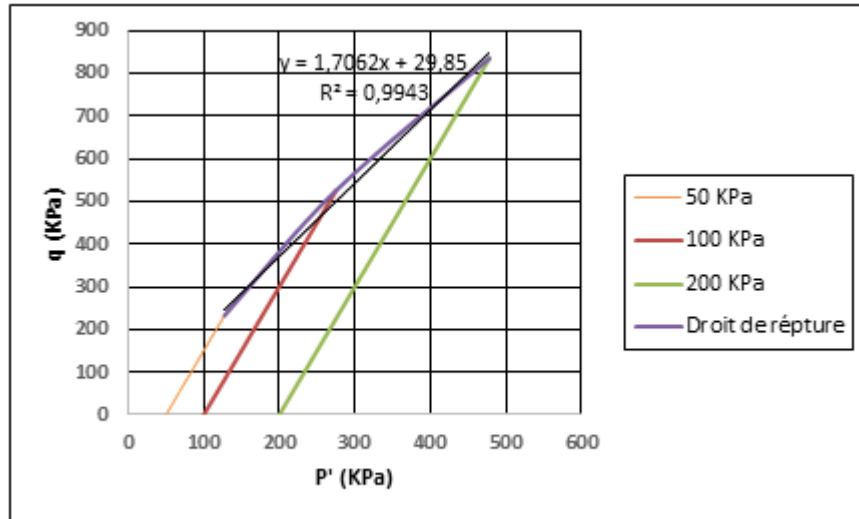


(a)



(b)

Le biopolymer est influé aussi sur les chemins des contraintes (figure 6.2c), on remarque une augmentation de la contrainte moyenne effective du mélange par apport au sable no traité.



(c)

Figure 6. 2: sable de Djamaa traité par XGle Essai de compression drainé sur

#### 6.4 Résultats des essais drainés sur sable traité par XG et renforcé par les fibres de PP

Une autre série d'essais triaxiaux drainés a été réalisée sur un sable traité par XG renforcé par des fibres de PP sous des pressions de confinement  $\sigma_c = 50, 100$  et  $200$  kPa. Les figures 6.3 à 6.5 montrent les résultats de ces essais.

Les courbes contrainte déviatorique-déformation axiale et déformation volumique-déformation axiale du résultat des essais de compression drainés réalisés sur des échantillons de sable traité par 1% de XG et renforcés par différents teneurs en fibre de PP, préparés à l'aide de la méthode de damage humide de Lade, sont illustrées dans les figures 6.3, 6.4 et 6.5. Toutes les figures montrent une amélioration significative de la résistance au cisaillement de tous les échantillons renforcés par différents teneurs en fibre.

Les valeurs des déviateurs de contrainte des échantillons renforcés lorsque on ajout des fibres de polypropylène sont les plus élevées. Ceci est principalement dû au fait qu'il y a un grand nombre de fibres de polypropylène dans le sol, lesquelles possèdent un poids spécifique plus faible par apport les autres fibres généralement utilisé dans le renforcement des sols.

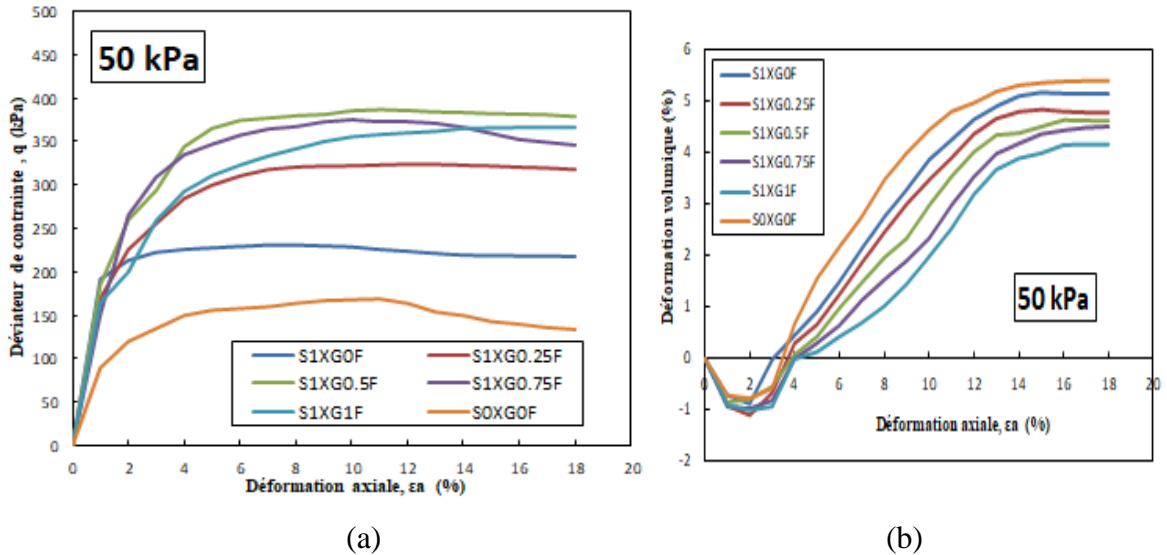


Figure 6. 3: Essai de compression drainée sur sol renforcé par fibre de PP, ( $\sigma_c = 50kPa$ )

Dans les courbes de changement de volume (6.3b, 6.4b et 6.5b), on observe que la dilatation est plus importante à chaque fois que le teneur en fibre augmente la dilatance diminue légèrement, on remarque que les échantillons étudiés commencent à se contracter avec une déformation axiale moyenne (2-4%) et ensuite passent à la phase de dilatance. Ceci est dû au fait que l'incorporation de fibre en présence de la gomme de xanthane empêchent la friction avec les particules de sol sableux et les réseaux de fibre, ce qui entraîne une augmentation de la contractance.

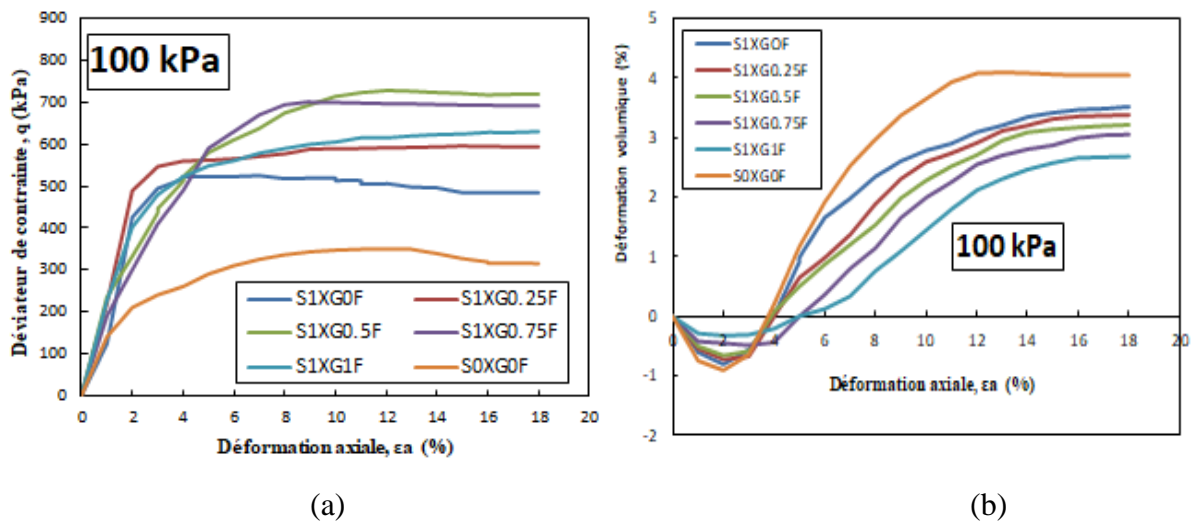


Figure 6. 4: Essai de compression drainée sur sol renforcé par fibre de PP, ( $\sigma_c = 100kPa$ )

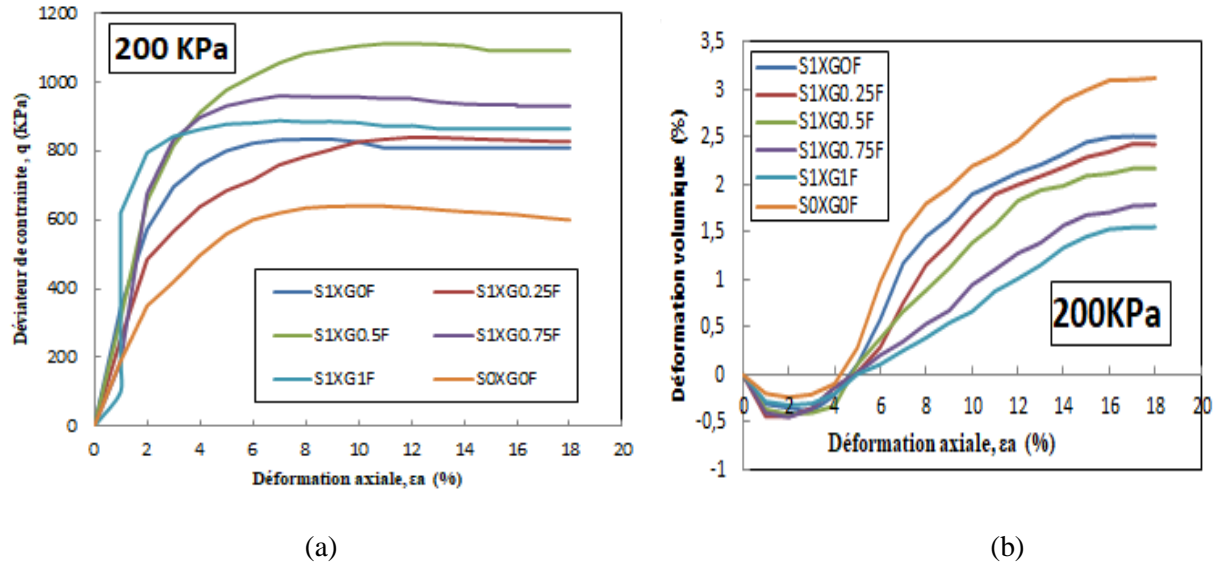
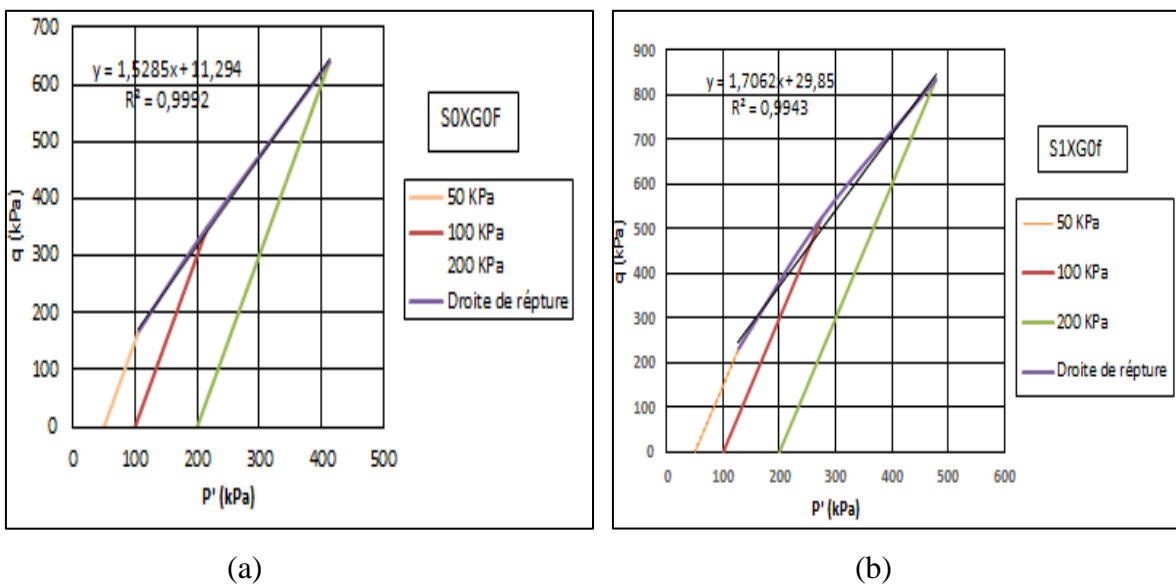


Figure 6. 5: Essai de compression drainée sur sol renforcé par fibre de PP, ( $\sigma_c = 200kPa$ )

Les chemins de contrainte ( $q, p'$ ) illustrent les effets du teneur fibre avec la présence de XG sur l'augmentation de la contrainte effective et de la déviateur de contrainte (voir Figure 6.6a, 6.6a à 6.6f). Ceci montre que l'impact de présence des fibres de manière aléatoire est important pour tous les échantillons consolidés à différente contrainte de confinement de 50, 100 et 200 kPa (Figure 6.6). Ceci est principalement dû au fait que la contrainte de confinement élevée affecte le comportement du sol renforcé, ce qui favorise l'influence des fibres distribuées de manière aléatoire qui empêche le bon fonctionnement des fibres et influé par la suite sur le comportement du sol.



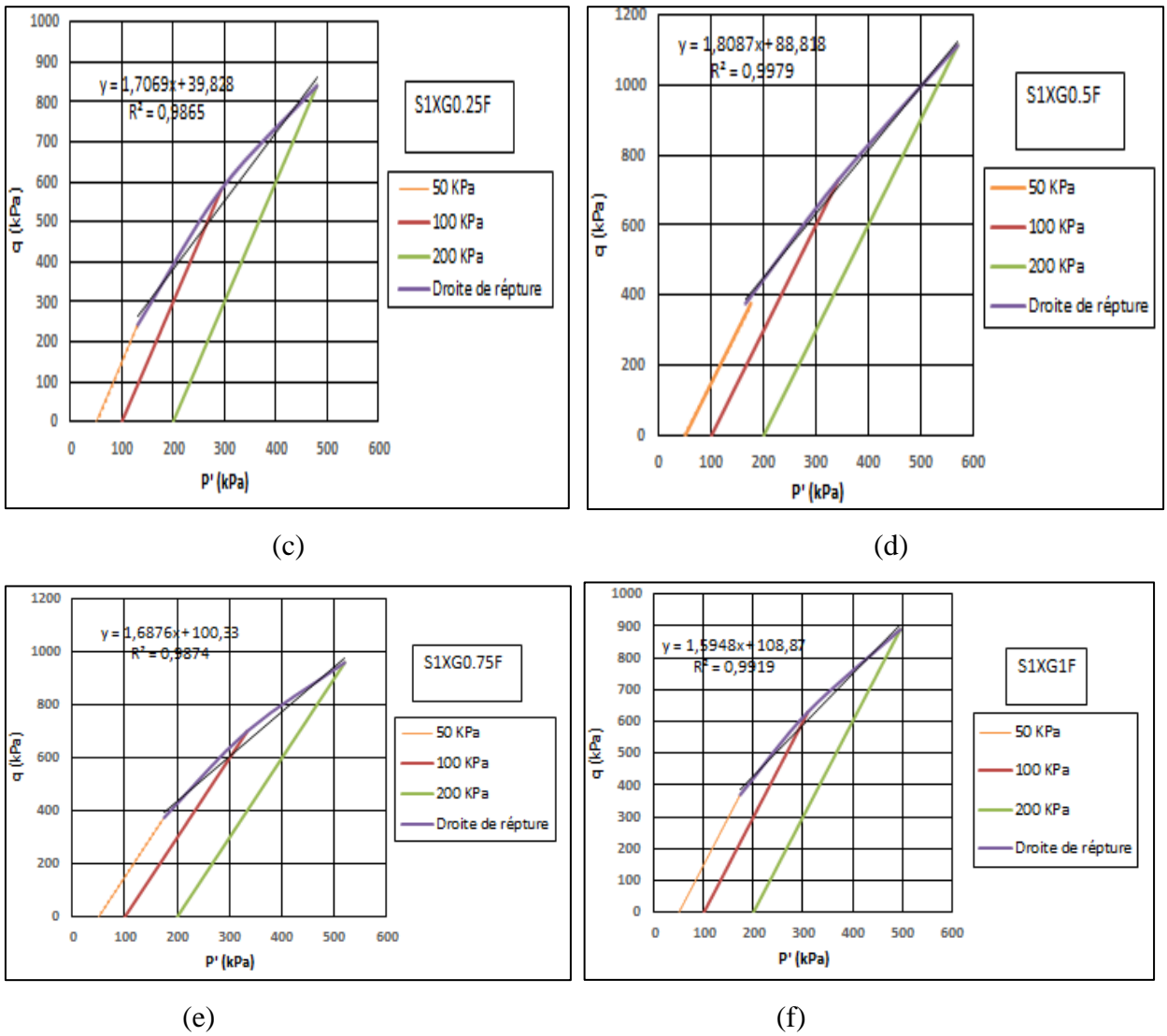


Figure 6. 6: Influence du teneur de fibre sur le chemin de contrainte du sable de Djamaa traité par 1% de XG, pour des contrainte de confinements:  $\sigma_c = 50\text{kPa}$ ;  $\sigma_c = 100\text{kPa}$ ;  $\sigma_c = 200\text{ kPa}$ .

Pour la détermination des paramètres intrinsèque ( $c'$  et  $\phi'$ ) à partir les plans de chemins de contrainte présenté dans la figure 6.6, la ligne de rupture peut être exprimée par une équation linéaire:

$$q = (M \times p') + q_0 \quad (6.1)$$

où  $M$  est la pente de la ligne et  $q_0$  est l'ordonnée à l'origine. La pente  $M$  est reliée à l'angle de frottement interne  $\phi$ , ou La pente  $M$  de la ligne de rupture est liée à l'angle de frottement interne  $\phi$  par la relation suivante:

$$M = 6 \times \sin(\phi') / (3 - \sin(\phi')) \quad (6.2)$$

En réarrangeant cette équation, on trouve  $\phi'$  :

$$\sin(\phi') = 3M / (6 + M) \quad (6.3)$$

L'angle de frottement et la cohésion du sol traité aux biopolymères et renforcer par les fibres

de PP ont été obtenus en traçant les chemins de contrainte, comme le montre la figure 6.6, dans ce stade l'angle de frottement a légèrement augmenté avec l'augmentation de teneur en fibre, tandis que un effet significatif de l'incorporation de fibre sur la cohésion, les résultats sont présentés dans le tableau 6.1. Le tableau ci-dessous résume les paramètres mécaniques pour les différentes combinaisons.

Tableau 6. 1: Les paramètres mécaniques du sable de Djamaa traité

Code	$c' (kPa)$	$\varphi' (^\circ)$
S0XG0F	6,52	37,52
S1XG0F	17,23	41,62
S1XG0.25F	23,01	41,64
S1XG0.5F	51,28	44,03
S1XG0.75F	57,90	41,22
S1XG1F	62,81	38,96

### 6.5 Effet de renforcement sur $q_{max}$

La figure 6.7 montre l'évolution du déviateur de contrainte maximale en fonction du nombre de géotextiles. On observe une augmentation significative de la résistance au cisaillement caractérisée par le déviateur de contrainte avec l'augmentation de teneur en fibre.

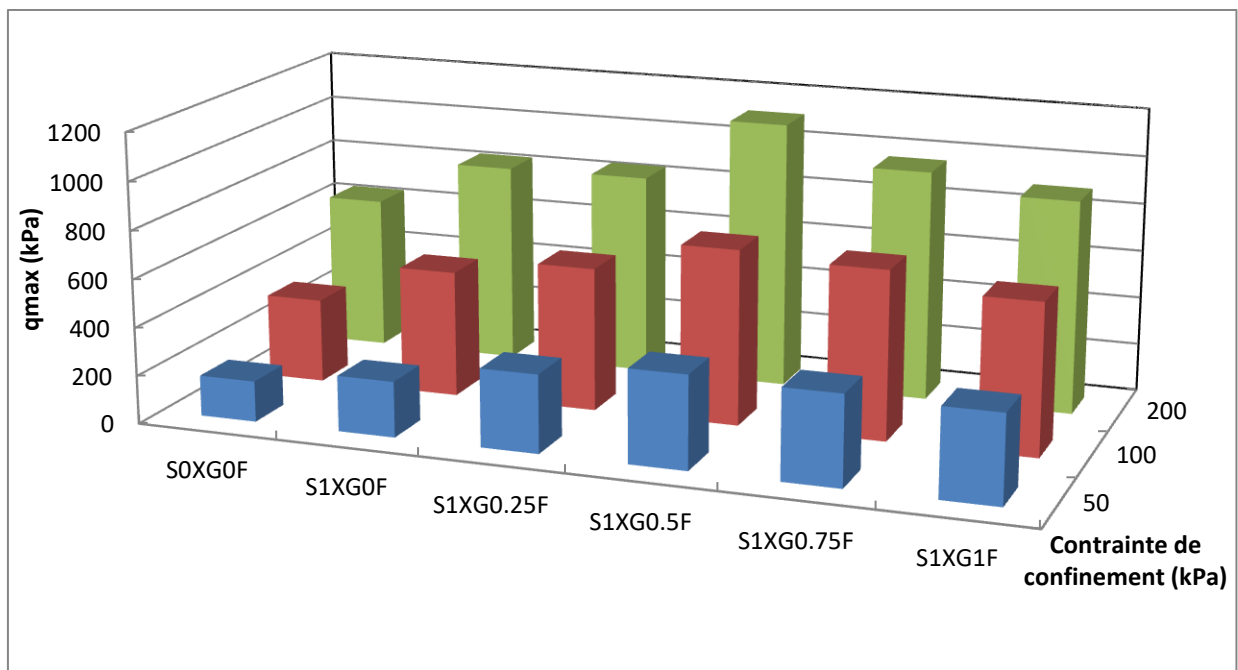


Figure 6. 7: Effet de XG et la teneur en fibre de PP sur le  $q_{max}$

Tableau 6. 2: Valeurs maximales du déviateur de contrainte et du coefficient de renforcement pour les échantillons renforcés

Teneur en fibre (%)	$\sigma_c$ (kPa)	$q_{\max}$ (kPa)	$S_r$ (-)
S0XG0F	50	169,0213	-
	100	350,1042	-
	200	640,7628	-
S1XG0F	50	231,013946	1,36677416
	100	525,383709	1,50064955
	200	835,025333	1,30317386
S1XG0.25F	50	324,140944	1,91775205
	100	595,893872	1,7020472
	200	840,602054	1,31187712
S1XG0.5F	50	386,896656	2,28904083
	100	728,869357	2,08186408
	200	1112,9637	1,73693558
S1XG0.75F	50	375,279152	2,22030686
	100	702,084513	2,00535873
	200	960,799605	1,49946221
S1XG1F	50	366,40909	2,1678279
	100	630,402059	1,80061267
	200	889,044043	1,38747762

### 6.6 Coefficient de renforcement ( $S_r$ )

Afin d'évaluer l'efficacité du renforcement de fibre dans le sable de Djamaa, nous déterminons le coefficient de renforcement ( $S_r$ ) comme défini par (Latha & Murthy, 2007).

$$S_r = q_{\max}^R \div q_{\max}^{NR} \quad (6.4)$$

Où  $q_{\max}^R$  et  $q_{\max}^{NR}$  sont les valeurs de déviateur de contraintes maximales respectivement pour des échantillons renforcés et non renforcés.

La courbe du coefficient de résistance (figure 6.8) est presque linéaire pour toute la contrainte de confinement, les résultats montrent une résistance à chaque contrainte de confinement par rapport au sable non renforcé. L'inclusion de fibres dans la masse du sol augmente le coefficient de renforcement ( $S_r$ ). Néanmoins, le rapport de résistance de sable renforcée par 0,5% de fibre de PP atteint 2,28 à une pression de confinement de 50 kPa et diminue à



environ 1,73 à 200 kPa.

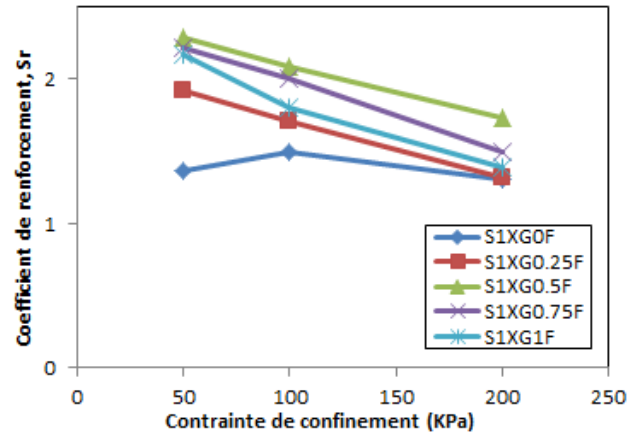


Figure 6. 8: Effet de teneur en fibre de PP à la présence de XG sur la variation du coefficient du renforcement

### 6.7 Comportement cyclique

La boucle d'hystérésis montrant le changement de la contrainte de cisaillement avec la déformation de cisaillement est illustrée à la figure 6.9. Comme le montre la figure, l'aire sous la courbe diminue avec l'augmentation du nombre de cycles. La raison de cette réduction est l'augmentation de la pression d'eau interstitielle. Au moment de la liquéfaction, d'autre part, l'aire sous la boucle se réduit considérablement et la boucle prend une forme presque droite pour une contrainte normale de 50 kPa.

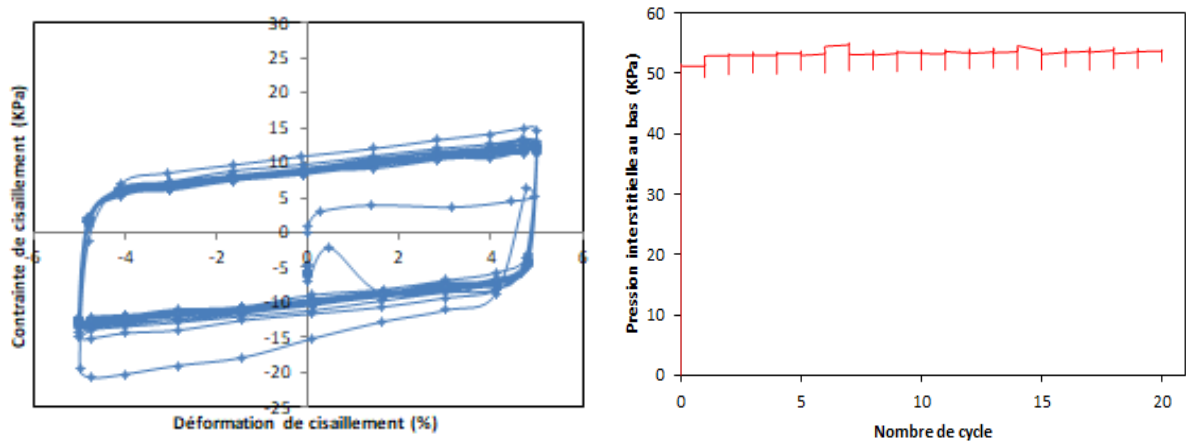


Figure 6. 9: (a) Boucle d'hystérésis typique sous cisaillement simple cyclique, (b) pression interstitielle au bas vs nombre de cycle d'un sable non renforcé

#### 6.7.1 Effet de teneur fibre sur la boucle d'hystérésis

La figure 6.10 montre la variation de la boucle d'hystérésis avec l'incorporation des fibres de PP pour une contrainte normal égale 50 kPa, on observons une diminution de la boucle pour les teneurs en fibre de 0.25 et 0.5%, cette diminution est due à la présence et le développement de reseau créé par les fibres, mais quand on ajoute 0.75 et 1% de fibre la boucle

augmente spécialement aux extrémités.

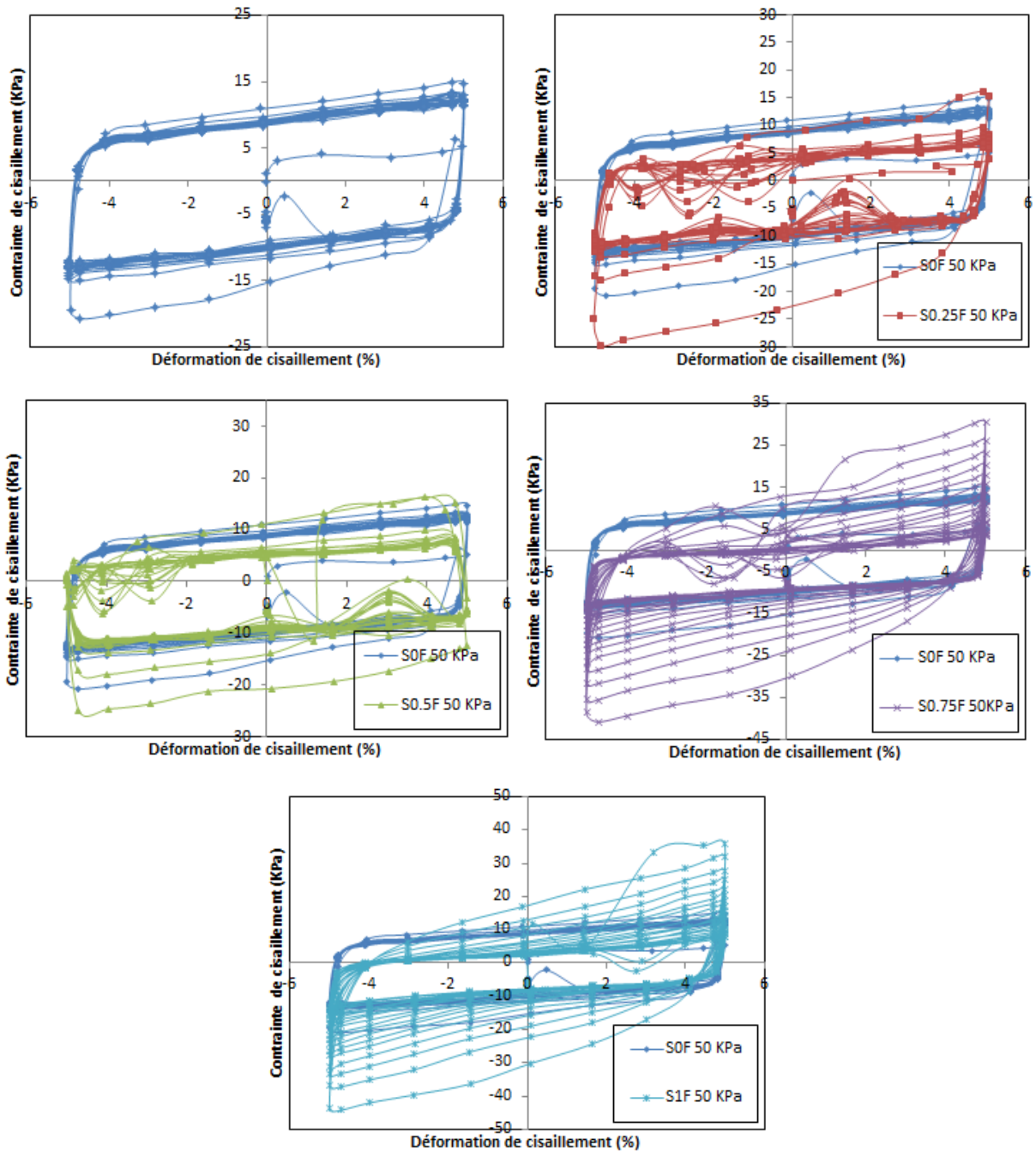


Figure 6. 10: Boucle d'hystérésis d'un sable non renforcé et renforcée avec différents teneur en fibre.

### 6.7.2 Effet de teneur en fibre sur la pression l'eau interstitielle

La figure 6.11 montre l'évolution de la pression d'eau interstitielle en fonction du nombre de cycles. La pression d'eau interstitielle, qui est l'un des indicateurs les plus importants de la liquéfaction du sol, augmente rapidement jusqu'à ce qu'elle soit égale à la contrainte effective verticale en raison de l'augmentation de la déformation de l'échantillon et de l'affaissement des grains de sable, et elle continue horizontalement avec le déclenchement de la liquéfaction. Dans la figure 6.11 a, la pression interstitielle augmente avec l'augmentation de teneur en

fibres, mais dans la figure 6.11 b,c la pression interstitielle diminue avec l'augmentation de teneur en fibre.

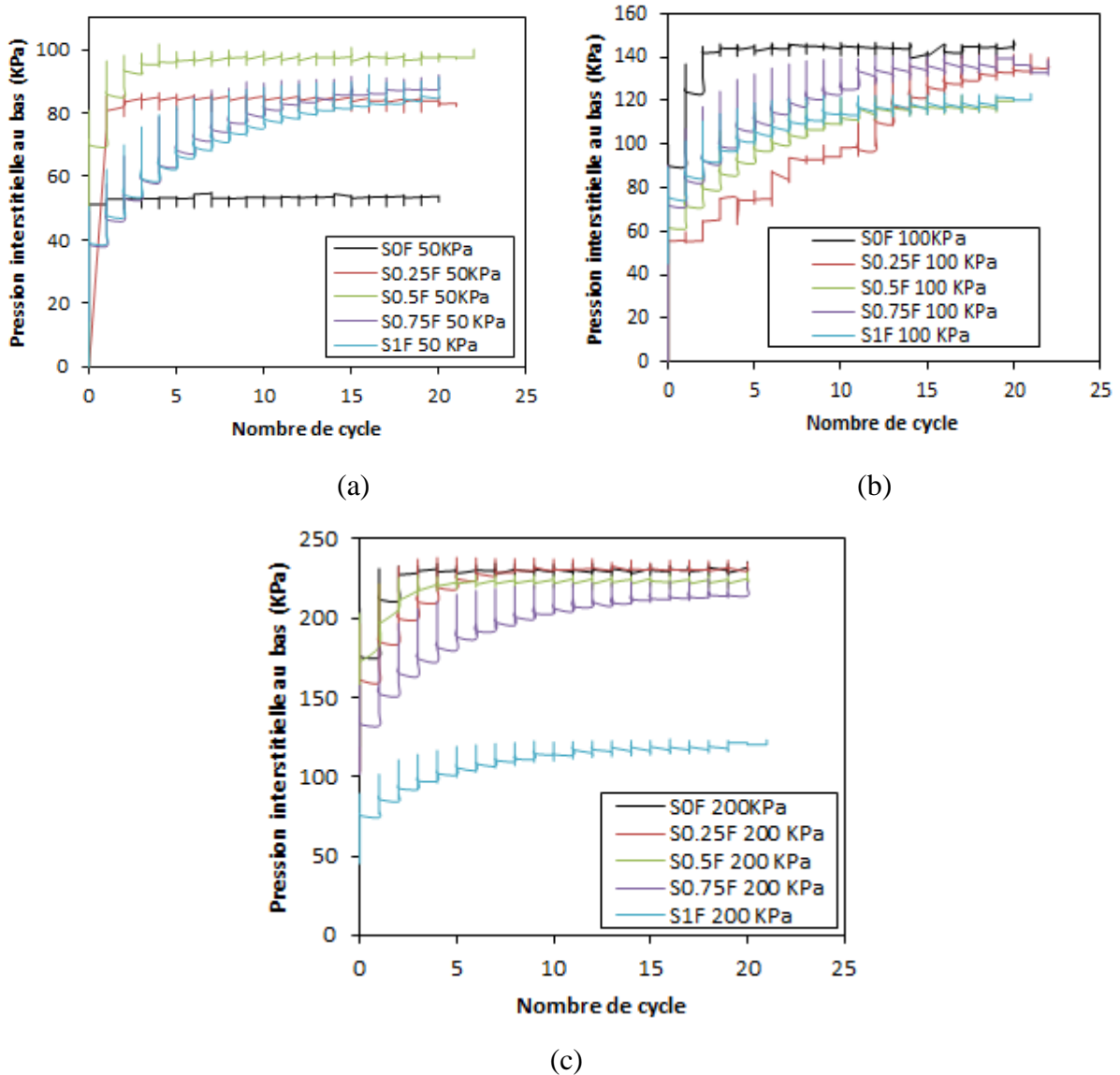


Figure 6. 11: Variation de pression interstitielle avec le nombre de cycle pour les différents teneurs en fibre (a)  $\sigma_c = 50 \text{ kPa}$ ; (b)  $100 \text{ kPa}$ ; (c)  $200 \text{ kPa}$

### 6.7.3 Effet de la teneur en fibres sur l'énergie de dissipation

L'évolution de l'énergie dissipée par unité de volume en fonction de la teneur en fibres est présentée dans la figure 6.12. Comme on observe sur la figure, l'énergie dissipée pour une contrainte normal de 50 kPa diminue avec l'ajoute de 0,25 % de fibre après il augmente à avec l'augmentation de teneur en fibre, contrairement pour une contrainte de 100 kPa l'énergie augmente à une valeur maximale de  $5547 \text{ J/m}^3$  pour une teneur en fibre de 0,25 % de fibre, après il diminue pour une teneur en fibre de 0,5 et 0,75%, puis l'énergie commence à augmenté légèrement pour une teneur de 1%. On pense que cette augmentation provient de l'augmentation de la résistance au cisaillement de l'échantillon de sol due à la présence de

fibres. Cela montre que les fibres mélangées au sable ont un effet significatif sur la susceptibilité du sol sableux à la liquéfaction.

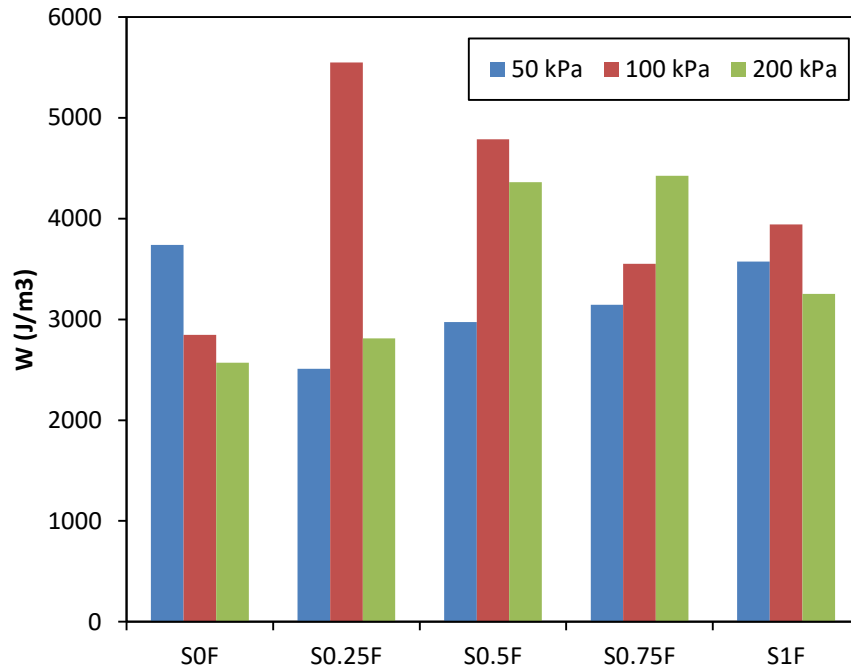


Figure 6. 12: Variation de l'énergie de dissipation en fonction de teneur en fibre

La boucle d'hystérésis devient encore plus large, mais des pertes de performance dans la dissipation de l'énergie peuvent se produire à une teneur en fibres très élevée en raison pour des interactions éventuelles entre les fibres et le sol qui ne sont pas suffisamment efficaces.

Dans la figure 6.11 à une teneur en fibres de 0,25%, lorsque des contraintes verticales de 50, 100 et 200 kPa sont appliquées, nous observons des graphiques différents et dispersés concernant l'évolution de la pression de l'eau interstitielle. En même temps, leurs valeurs d'énergie de liquéfaction changent également de manière irrégulière (ou disproportionnée).

Cette augmentation irrégulière de la pression de l'eau interstitielle et les valeurs d'énergie de liquéfaction distribuées de manière irrégulière (comme l'augmentation des valeurs d'énergie de liquéfaction) sont également observées pour les rapports de mélange de 0,5% fibre et de 1,0% fibre.

Néanmoins, à un rapport de fibres de 0,75%, nous observons que la valeur de la pression de l'eau interstitielle change parallèlement (ou dans une bonne proportion) à la valeur de la contrainte verticale appliquée. En d'autres termes, lorsque la valeur de la contrainte verticale augmente, la valeur de l'énergie de liquéfaction, qui dépend de la valeur de la pression de l'eau interstitielle, augmente également de manière proportionnelle.

Ainsi, nous déterminons que le dosage de fibres le plus approprié pour réduire le risque de liquéfaction de ce sol sableux (c'est-à-dire pour augmenter sa résistance à la liquéfaction) est de 0,75 fibre.

A part la teneur de 0,75% fibre, les mélanges de fibres de 0,25, 0,50 et 1,0% ne sont pas des teneurs satisfaisants pour réduire le risque de liquéfaction de ce sol. La teneur de fibres le plus approprié à ajouter à ce sol est 0,75%.

Nous constatons également cette situation dans les histogrammes. Le rapport de mélange de fibres le plus approprié de 0,75% est également clair dans l'histogramme (figure 6.12).

## **6.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, les résultats des essais triaxiaux monotones drainés réalisés sur le sable naturel de Djamma traité par 1% de XG et renforcé par les fibres de PP et d'autres séries d'essais cycliques sur le même sable renforcé uniquement par les fibres de PP pour évaluer l'effet des fibres sur la liquéfaction, ont été présentés. Les résultats dégagés d'essais triaxiaux monotones sont représentés en termes du déviateur de contrainte.

Les résultats ont montré que l'inclusion de fibres augmente considérablement le déviateur de contrainte, améliore les caractéristiques mécaniques du sable et provoque une amplification du caractère dilatant du sable. Les fibres de polypropylène présentent un taux d'amélioration plus important. Cette amélioration est justifiée par la résistance à la traction du fibres.

La contrainte de confinement à un effet significatif sur la résistance du sable non renforcé et renforcé avec fibres.

Les essais cycliques sur un sable renforcé par les fibres de PP, dévoile que :

- L'ajout de fibre sur l'échantillon du sable peut limiter la liquéfaction.
- La teneur élevée des fibres de PP réduit la pression interstitielle.
- Un teneur de 0.75% représente une teneur optimale pour minimiser le risque de liquéfaction.

## **CHAPITRES VII : Modélisation Numérique**

---

Ce chapitre présente une étude numérique de l'essai triaxial type consolidé drainé d'un sable de Djamaa traité par XG biopolymère et renforcé par les fibres de PP.

## 7.1 Introduction :

L'essai triaxial consolidé drainé (CD) représente l'un des essais au laboratoire les plus utilisées pour déterminer les propriétés mécaniques des sols. Dans ce chapitre, un modèle numérique d'un essai triaxial CD sous chargement statique est élaboré en utilisant le logiciel Plaxis 2D pour étudier la réponse contrainte-déformation et l'effet de la teneur en fibre de PP et le biopolymère, comme la gomme xanthane, sur les sols sableux. L'objectif principal est de simuler le comportement d'un sol stabilisé dans des conditions drainées, ce qui permettra de mieux comprendre les propriétés mécaniques telles que la cohésion et l'angle de frottement interne.

## 7.2 Configuration de modèle

Un essai triaxial est modélisé à l'aide d'une géométrie axisymétrique de dimensions égales ( $0.14 \times 0.07\text{m}$ ), représentant un échantillon de sol lors d'un essai au laboratoire de type CD (figure 7.1).

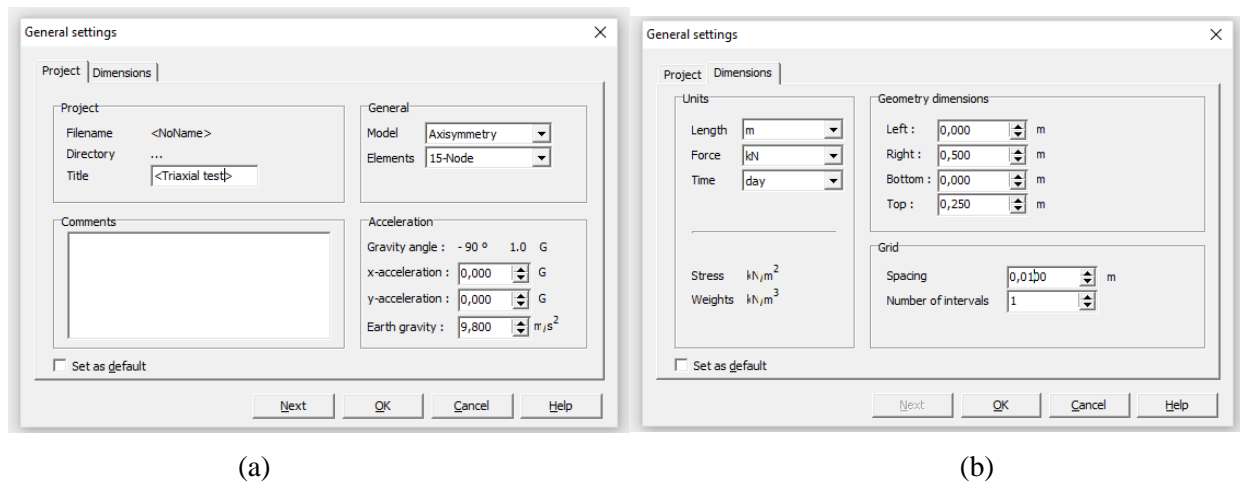


Figure 7. 1: (a) et (b) Paramètres généraux de configuration.

## 7.3 La géométrie du modèle

L'échantillon sera modélisé en deux dimensions avec une axisymétrie et un élancement de 2 (7 cm de diamètre par 14 cm de hauteur). Seul un quart de l'échantillon est utilisé dans les calculs en raison de sa symétrie comme il montre la figure 7.2.

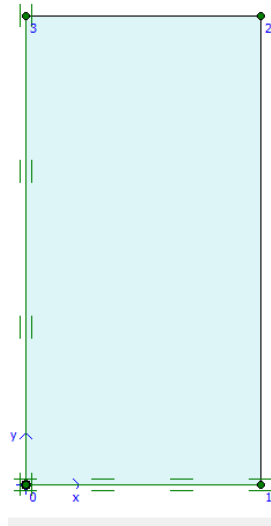


Figure 7. 2: Modèle géométrique de l'essai triaxial sous chargement monotone.

Le maillage est constitué d'éléments triangulaires à 15 nœuds. Le maillage adopté est très fin (figure 7.3).

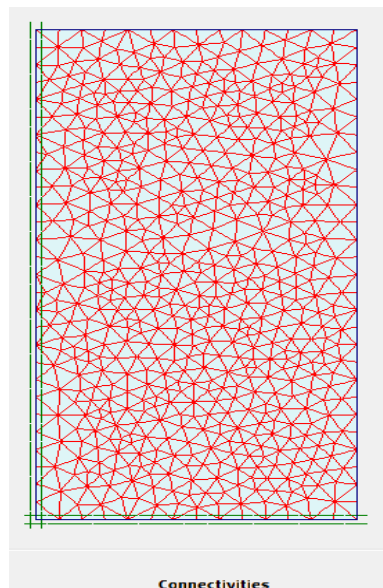


Figure 7. 3: Maillage du modèle



## 7.4 Propriétés du sable

Les propriétés de sable sont résumées dans le tableau 7.1.

Tableau 7. 1: Propriétés du sable

Paramètres	Nom	Valeur	Unité
Modèle type	MC	-	-
Type de comportement	Drainé	-	-
Poids volumique sec	$\gamma_{\text{unsat}}$	19	kN/m <sup>3</sup>
Poids volumique humide	$\gamma_{\text{sat}}$	20	kN/m <sup>3</sup>
Perméabilité horizontale	$K_x$	5	m/day
Perméabilité verticale	$K_y$	5	m/day
Module d'Young	$E_{\text{ref}}$	350	kN/m <sup>2</sup>
Coefficient de poisson	$\nu$	0,35	-
Cohésion	$c$	6,52	kN/m <sup>2</sup>
Angle de frottement	$\phi$	37,52	°
Angle de dilatation	$\psi$	7	°
Facteur de rigidité de l'interface	$R_{\text{inter}}$	Rigide	-

La simulation de chargement consiste en deux étapes pour chaque contrainte de confinement  $\sigma_3$ , avec des valeurs de contrainte de 50, 100 et 200 kPa. Dans la première étape, une contrainte isotrope (A) correspondant à la contrainte de confinement  $\sigma_3$  est appliquée au côté supérieur et au côté droit. Dans la deuxième phase, seule une contrainte verticale (B) est appliquée à la partie supérieure jusqu'à la rupture, tandis que la contrainte horizontale est maintenue constante. Le modèle de calcul est illustré à la figure 7.4.

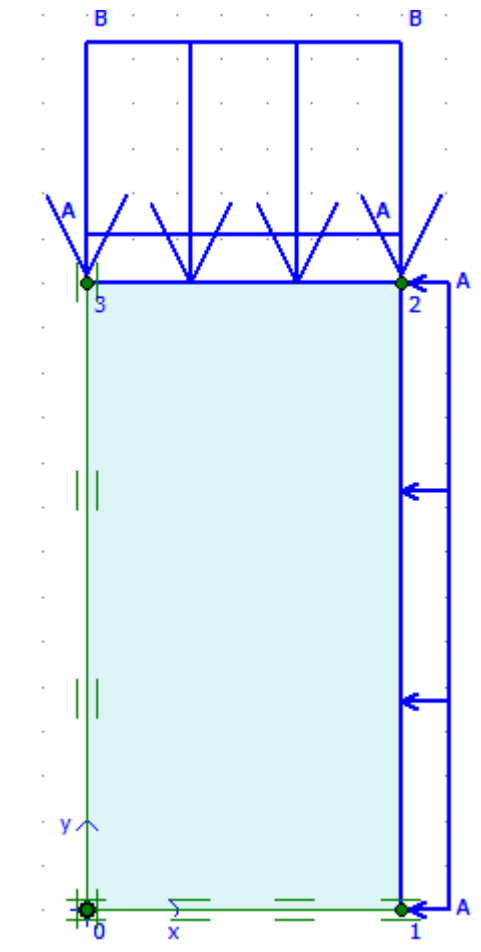
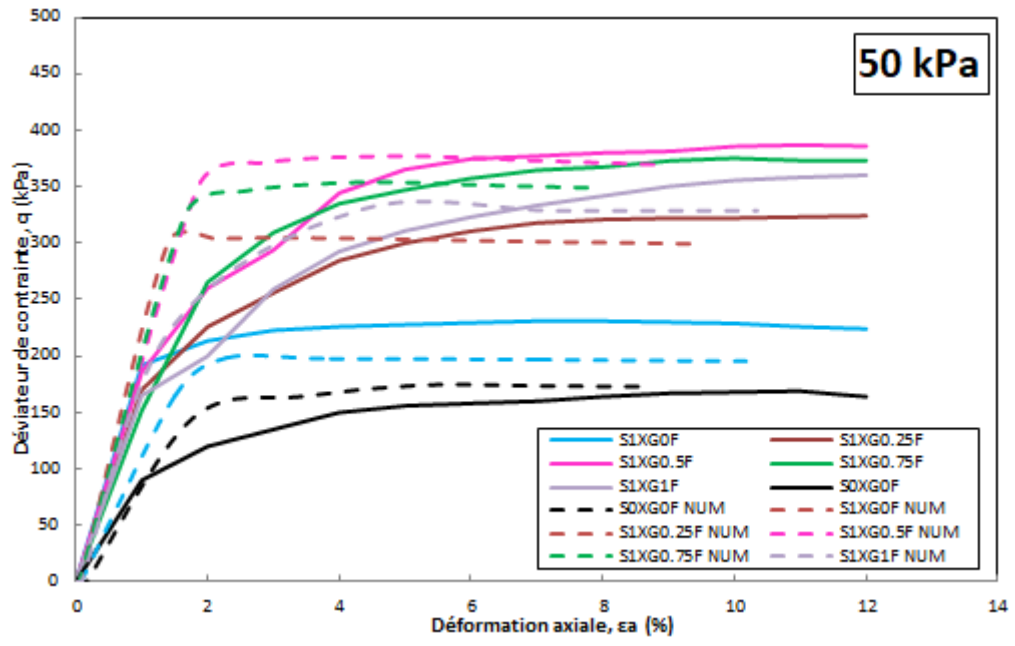


Figure 7. 4: Modèle de calcul

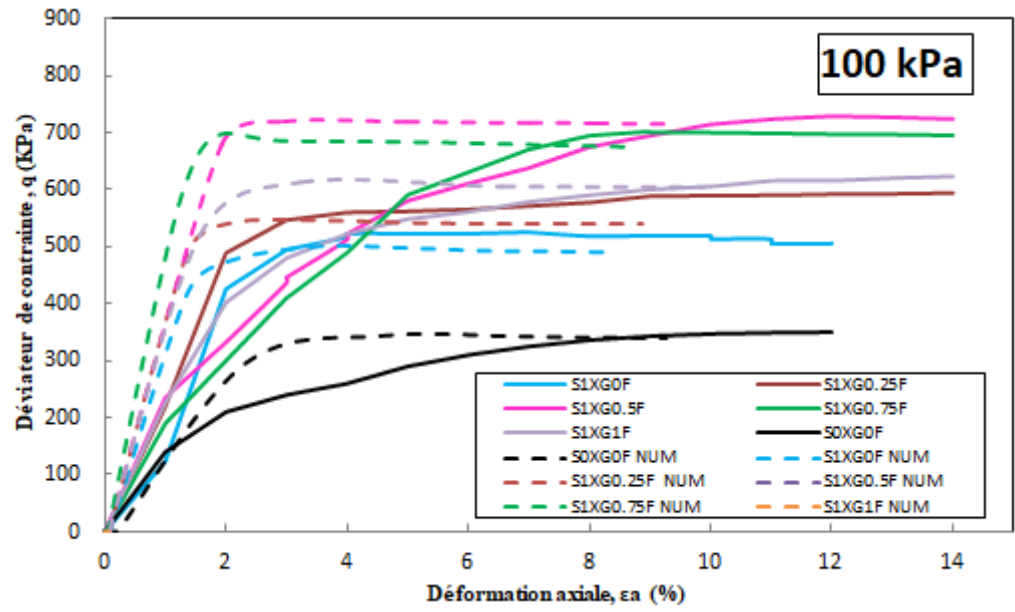
## 7.5 Présentation des résultats

### 7.5.1 Effet de teneur en fibre et la contrainte de confinement sur le déviateur de contrainte

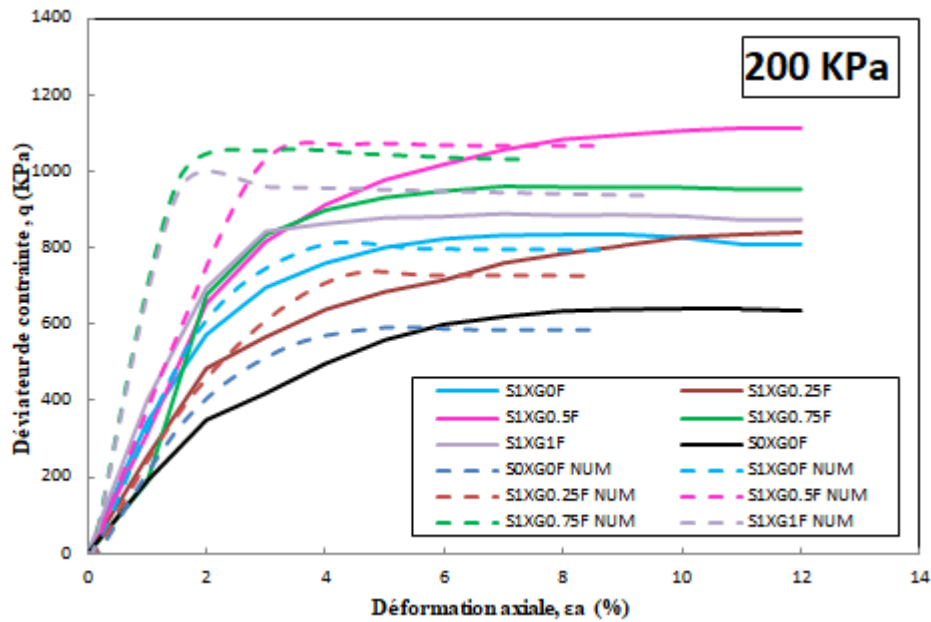
Les résultats de la modélisation numérique de l'essai triaxial se comparent aux résultats expérimentaux présentés dans la figure 7.5.



(a)



(b)



(c)

Figure 7. 5: Résultats expérimentaux et numériques : (a)  $\sigma_c$  (50 kPa), (b)  $\sigma_c$  (100 kPa) et (c)  $\sigma_c$  (200 kPa)

Les résultats de la modélisation de l'essai triaxial par le logiciel Plaxis 2D Version 8.2 donnant les courbes déviatoriques en fonction des déformations axiale sont présenté respectivement par les figures 7.5.

Les résultats que nous avons obtenus avec le logiciel Plaxis indiquent une courbe initiale linéaire, dont la pente augmente avec la valeur de  $\sigma_3$ , suivie d'un changement progressif. Ces courbes confirment que le comportement contrainte-déformation du matériau sont similaires aux courbes expérimentales.

La comparaison entre les courbes déviatoriques numériques et expérimentales de la figure 7.5 montre que les résultats sont acceptables en termes de contraintes maximales et en termes d'écart par rapport aux courbes. Les courbes numériques correspondent approximativement aux courbes expérimentales pour toutes les contraintes latérales ; Pour les quatre valeurs de contraintes latérales, les contraintes maximales obtenues par la simulation numérique sont similaires à celles des essais expérimentaux. Les mêmes valeurs de départ sont observées, ce qui signifie que les modules d'élasticité sont à peu près égaux.

### 7.5.2 Effet de teneur en fibre sur la variation de la contrainte effective

La figure 7.6 présente la variation de la contrainte effective pour un milieu traité par le XG et renforcé par différents teneurs en fibre de PP par rapport à un milieu non traité. Les résultats montrent une augmentation significative de la contrainte effective avec l'incorporation des fibres.

Les fibres de PP aident à redistribuer la contrainte dans la masse du sable traité par XG de manière plus uniforme. Lorsqu'une contrainte est appliquée à un sable renforcé par les fibres, les fibres supportent une partie de la charge appliquée, ce qui permet de la répartir sur une plus grande surface et d'éviter une concentration localisée de la contrainte. Cette redistribution de la contrainte augmente la contrainte effective dans la masse du sol, car les fibres contribuent à conserver un contact entre les particules et réduisent la possibilité d'une rupture locale ou d'une déformation excessive.

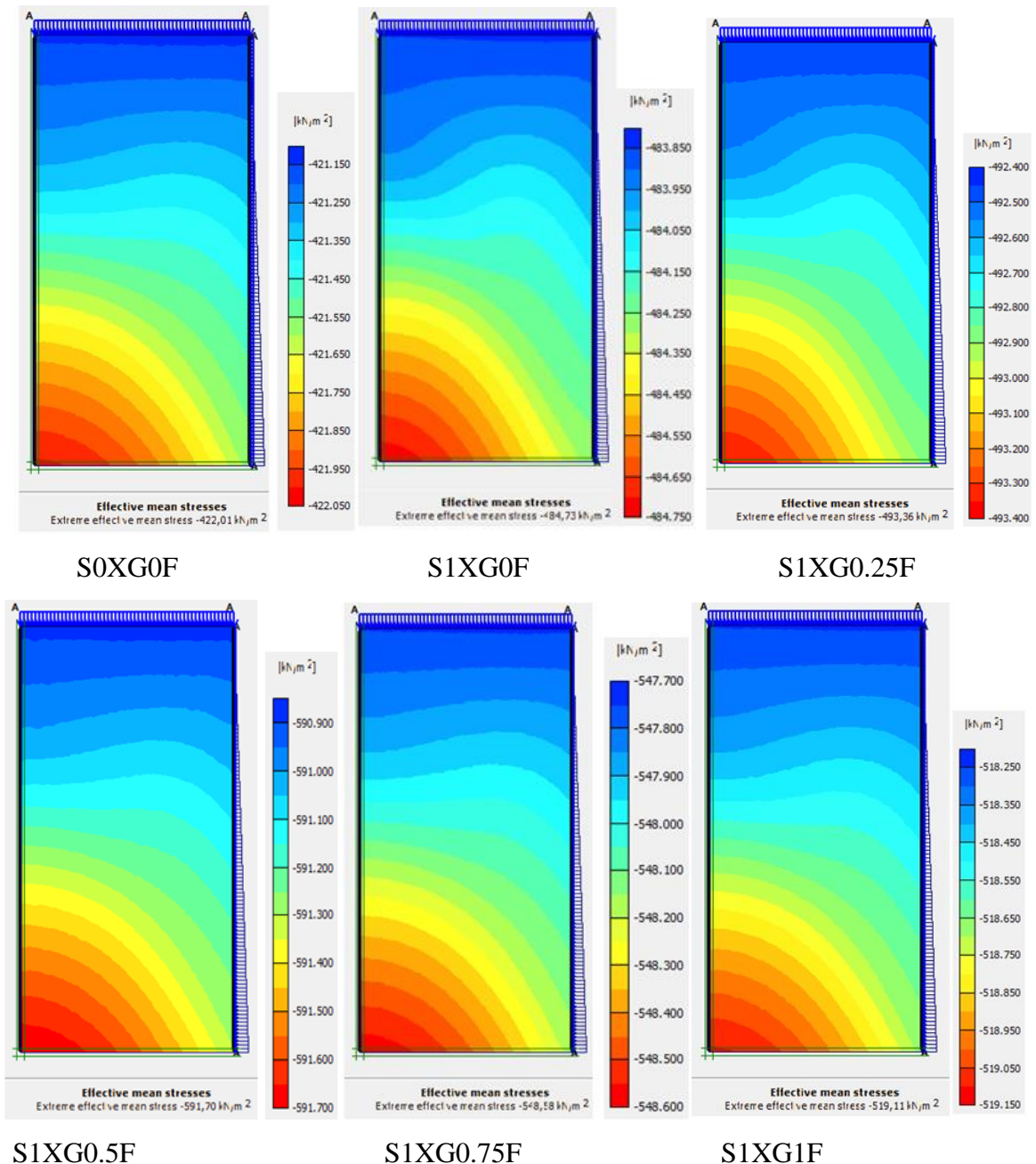


Figure 7. 6: La variation de la contrainte effective pour une même contrainte de confinement

$$\sigma_c=200 \text{ kPa}$$

## 7.6 Conclusion

Le dernier chapitre présente les résultats de la modélisation bidimensionnelle axisymétrique

du modèle réduit d'un sol sableux traité avec du XG et renforcé par des fibres de PP. Cette partie montre les effets de la teneur en fibres PP sur le comportement statique d'un sol à faible résistance :

- L'effet de l'ajout de fibre à un pottentiel importante d'augmenter le diviateur contrainte.
- La simulation numérique montre un effet significative sur le déviateur de contrainte simultanément avec les résultats expérimentaux.

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous avons élaboré un plan qui consiste à étudier le comportement des sols renforcés par des fibres, en mettant l'accent sur les mélanges d'un sol sableux (sable de Zemmouri, El hadjeb et Djamma). L'objectif de cette étude concerne dans une première partie, une étude expérimentale du comportement de sable de renforcés par des fibres et traité par le biopolymère, et dans une deuxième partie, une étude numérique basée sur la méthode des éléments finis pour simuler le comportement d'un matériau granulaire non renforcé et renforcé par différents teneurs en fibre.

Le programme expérimental porte sur l'étude du comportement du sable renforcé avec des quantités variables de fibre, non traité et traité par le biopolymère. L'étude a été menée à travers les principaux types de sollicitations mécaniques à savoir, le cisaillement direct à la boîte, compression uni-axiale, le cisaillement triaxial à l'aide de l'appareil triaxial, et les sollicitations cyclique.

A l'issue de ce travail, les conclusions les plus importantes sur le comportement mécanique des sols sableux étudiés, renforcés par des fibres ou traité par biopolymère, sont résumées ci-dessous :

Le renforcement des échantillons de sable par des fibres recyclées sous des essais de cisaillement direct permet de :

1. Réduire l'impact des déchets plastiques solides sur l'environnement et contribuer à la durabilité.
2. Améliorer les propriétés mécaniques, en augmentant la cohésion et de l'angle de frottement et ce pour toutes les densités étudiées.
3. Déterminer la teneur optimale en fibres recyclées. Pour atteindre la résistance de cisaillement maximale au cisaillement du sable de Zemmouri est de 0,4 % et 0,6 % pour une densité relative de 25 % et 49 %, respectivement, dans des conditions sèches.
4. Réduire la dilatance du sol dans les échantillons préparés à une densité faible et augmente la tendance à la dilatance dans les échantillons denses. Ce phénomène peut être expliqué par les caractéristiques de la matrice reliant la fibre au sable, qui dépend fortement de la densité relative et de l'apport de fibres de renforcement. Les fibres distribuées de manière aléatoire offrent une isotropie de la résistance et limitent les plans de rupture qui peuvent se développer en parallèle au renforcement de la matrice.

Par ailleurs, les essais de compression biaxiale ont permis d'obtenir plus de précision et de détails sur l'effet du biopolymère et de la fibre de polypropylène sur la résistance à la

compression pour les deux types de sable de dune étudié.

**1.** L'ajout de gomme xanthane (XG) à un sol sableux augmente sa ductilité, c'est-à-dire sa capacité à se déformer sous l'effet d'une contrainte élevée. Dans ce cas, l'amélioration est proportionnelle à la teneur en XG.

**2.** Le renforcement du sol à l'aide de la gomme xanthane (XG) entraîne une augmentation légère de la résistance et de la rigidité. Cette amélioration ne se manifeste que lorsque la durée de durcissement dépasse 7 jours et que la teneur en XG est supérieure à 0,5 %.

**3.** Les images du MEB montrent l'efficacité de la gomme xanthane en tant que liant pour le traitement du sable des dunes. La gomme xanthane remplit les vides entre les particules de sable, créant des liens qui augmentent la résistance dans le sable grossier.

En outre, les essais triaxiaux réalisés ont permis d'obtenir plus de détails sur le comportement des mélanges (sable-biopolymer-fibre), notamment en ce qui concerne l'importance de l'inclusion des fibres et leur rôle dans l'augmentation de la résistance au cisaillement.

**1.** Il est noté que les inclusions de fibres limitent les déformations latérales du sol, ce qui améliore la résistance à la liquéfaction. Ceci est consolidé par le fait que l'éprouvette de sable renforcé conserve sa forme cylindrique même après extraction de sa membrane.

**2.** À une teneur en XG fixe, le comportement des sols renforcés par des fibres est influencé principalement par les teneurs et les caractéristiques des fibres. Les inclusions ayant une résistance à la traction plus élevée ont montré des valeurs de déviateur de contrainte plus élevés.

Dans une série d'essais de cisaillement simple cyclique à déformation contrôlée, menée en vue d'évaluer la susceptibilité à la liquéfaction des sables renforcés par des fibres. Sur la base des résultats dégagés, on n'a constaté que la présence des fibres :

- 1.** La présence des fibres réduit l'évolution de la pression interstitielle.
- 2.** L'inclusion de fibres a augmenté de manière significative la quantité d'énergie dissipée nécessaire pour déclencher la liquéfaction.
- 3.** L'ajout de fibres de polypropylène renforce la matrice du sol en augmentant l'interaction mécanique entre les grains de sable et les fibres. Cela améliore la cohésion et réduit la mobilité des particules sous un chargement cyclique.

D'un autre côté, l'utilisation de la méthode des éléments finis dans cette recherche est justifiée par la nécessité de comprendre le comportement des sols non renforcés et des sols renforcés par des fibres. Le modèle numérique a commencé par simuler des essais triaxiaux drainés, non renforcés et renforcés sur la base des résultats expérimentaux, puis a vérifié son efficacité



en comparant les résultats mesurés et calculés.

La modélisation numérique proposée dans le présent travail, en utilisant le logiciel d'éléments finis (Plaxis 2D 8.2) avait pour objectif, l'analyse du comportement du sol renforcé et non renforcé dans un essai triaxial drainé. L'étude a porté sur le comportement du sable renforcé par des fibres synthétiques et a examiner l'effet de la teneur en fibre. Les résultats du modèle numérique dévoilent une certaine concordance avec les résultats expérimentaux. L'étude a montré que le modèle numérique peut être calibré avec les résultats d'essais expérimentaux afin de mieux comprendre l'interaction entre le sol et les matériaux de renforcement. Cependant, le modèle sélectionné nécessite un développement davantage, en particulier pour comprendre le comportement des géosynthétiques et les différentes conditions d'essai triaxial.

Les résultats obtenus consolident les résultats récoltés de la littérature et ouvrent de nouveaux horizons sur le renforcement des sols sableux, notamment en Algérie, dans les zones susceptibles d'être soumis à une activité sismique importante. Cette modeste contribution est également très utile pour une étude plus approfondie des sols sableux, car les matériaux étudiés sont largement utilisés dans les régions Nord et Sud Algériens soit comme matériaux support (assise des fondations et couche d'assise des routes) ou bien comme matériaux de construction.

## RECOMMANDATIONS

A la lumière des résultats obtenus de la présente étude, nous recommandons

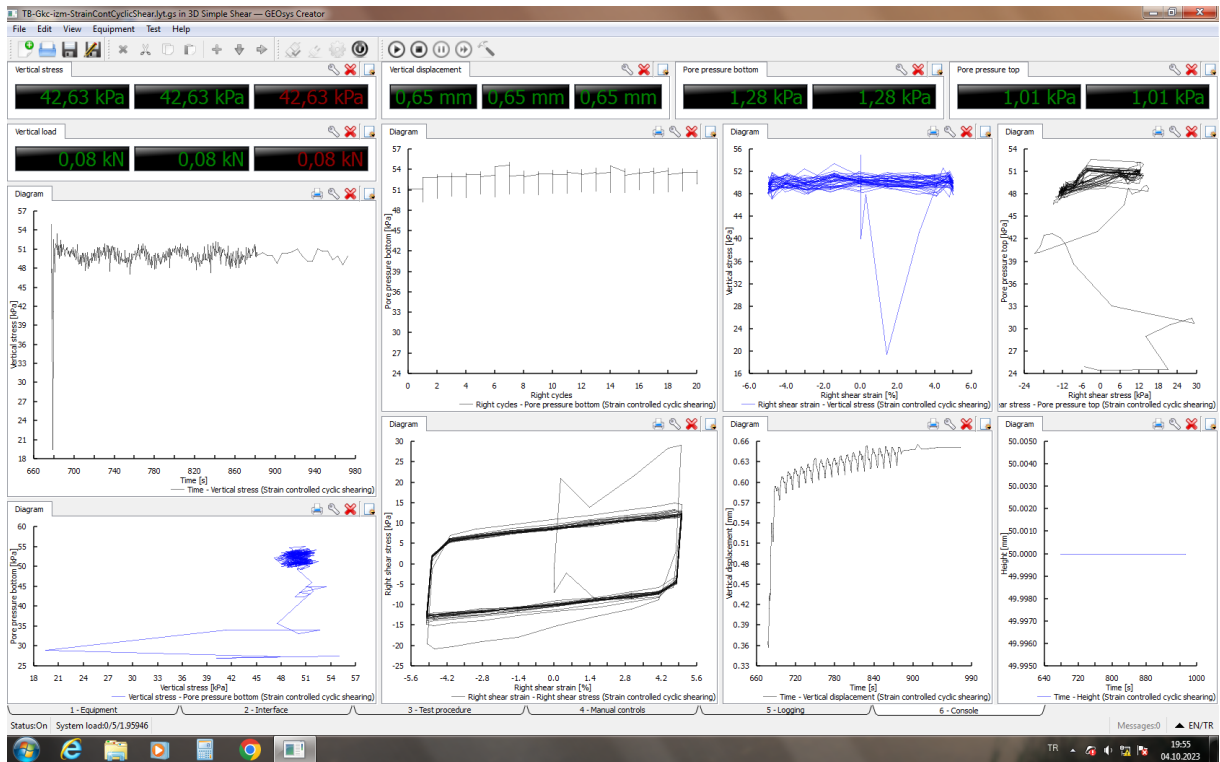
- ✓ L'exploitation des résultats obtenu pour créer une base de données. Cette dernière peut être valorisée par une analyse numérique afin de mieux comprendre le comportement des sols renforcés, notamment au niveau de l'interface sol/renforcement et donc mieux interpréter le passage des caractéristiques mécaniques du sol non renforcé aux caractéristiques équivalentes du sol renforcé.
- ✓ La modélisation en 3D en utilisant des codes d'éléments discrets (DEM) d'un site renforcé.
- ✓ Exploration d'autres aspects expérimentaux, notamment des essais triaxiaux dynamiques sur des échantillons de sol traité par biopolymères et/ou renforcé par des matériaux géosynthétiques. Ces essais permettront de comprendre l'effet synergétique des biopolymères et les géosynthétiques sur la résistance au cisaillement des sols en diminuant les déformations de volume et la pression interstitielle.

# ANNEXES

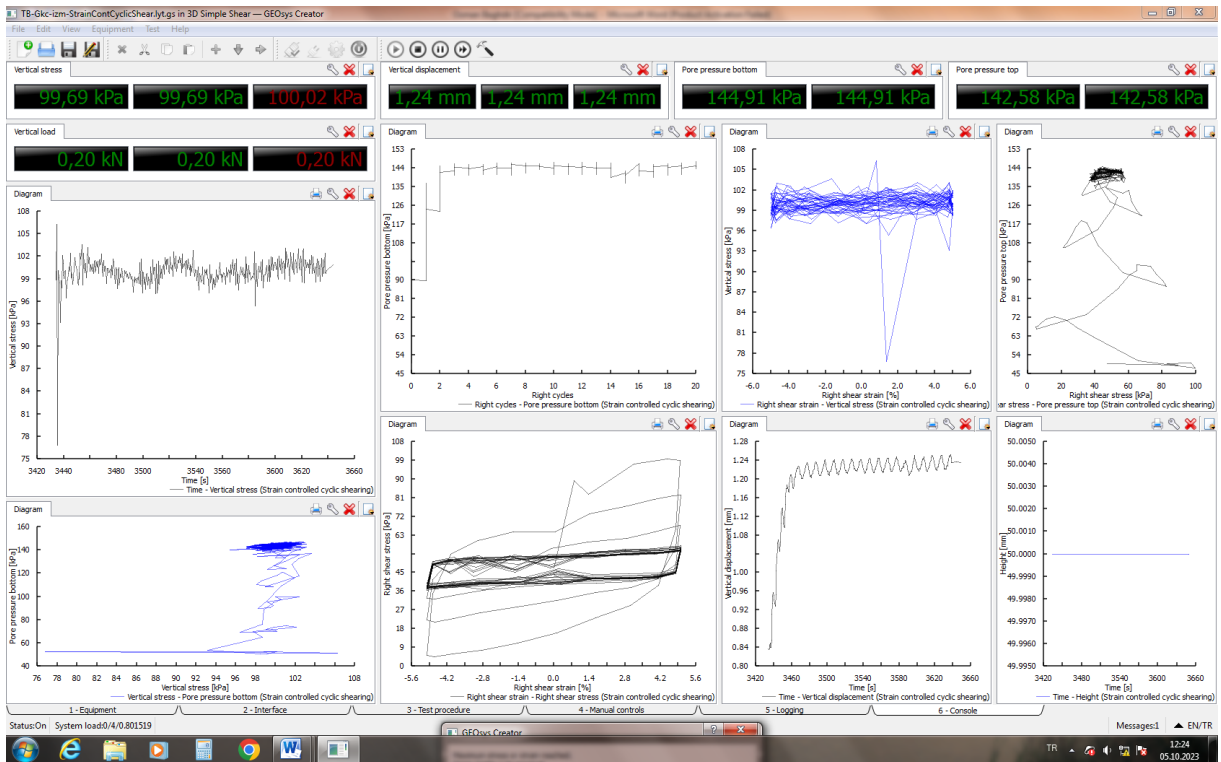
## RAPPORTS D'ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE CYCLIQUE

Cette annexe regroupe les résultats d'essais de cisaillement simple cyclique d'un sable de Djamaa, les essais sont réalisés au laboratoire de MDS à l'université de Ankara.

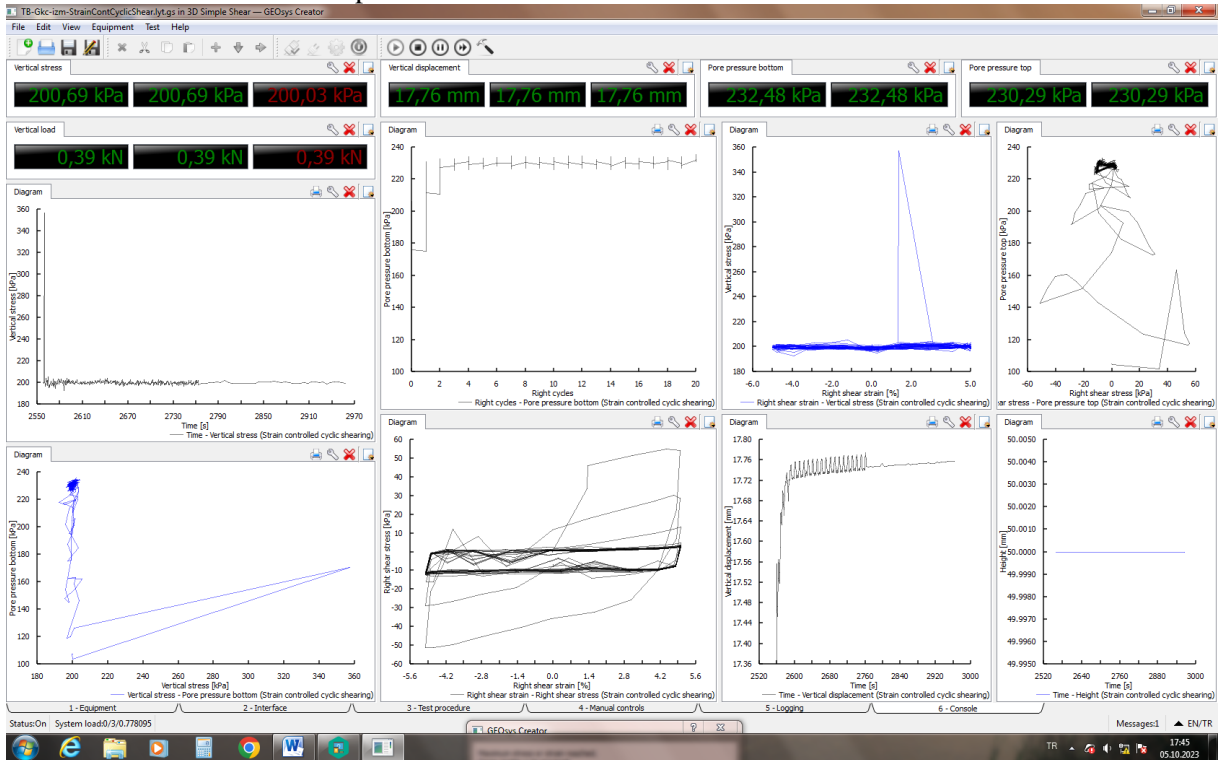
- Les résultats de SOF pour un contrainte normale de 50 KPa.



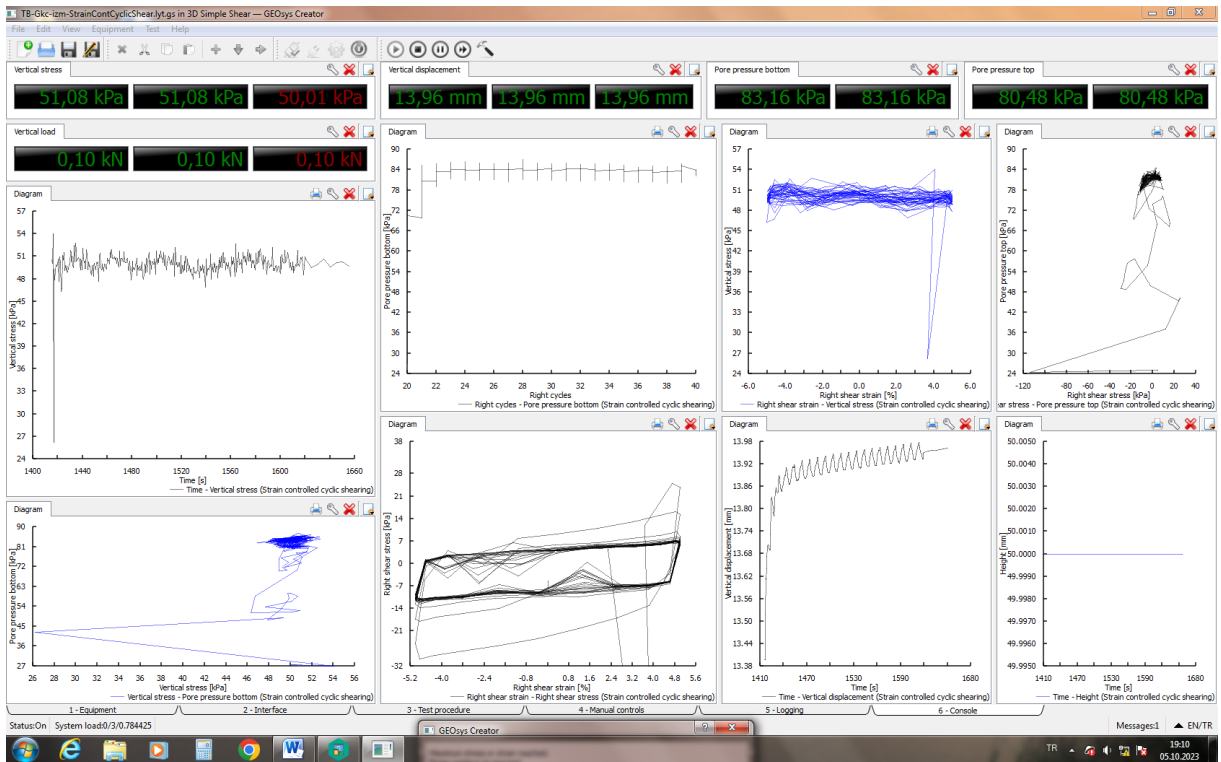
- Les résultats de SOF pour un contrainte normale de 100 KPa.



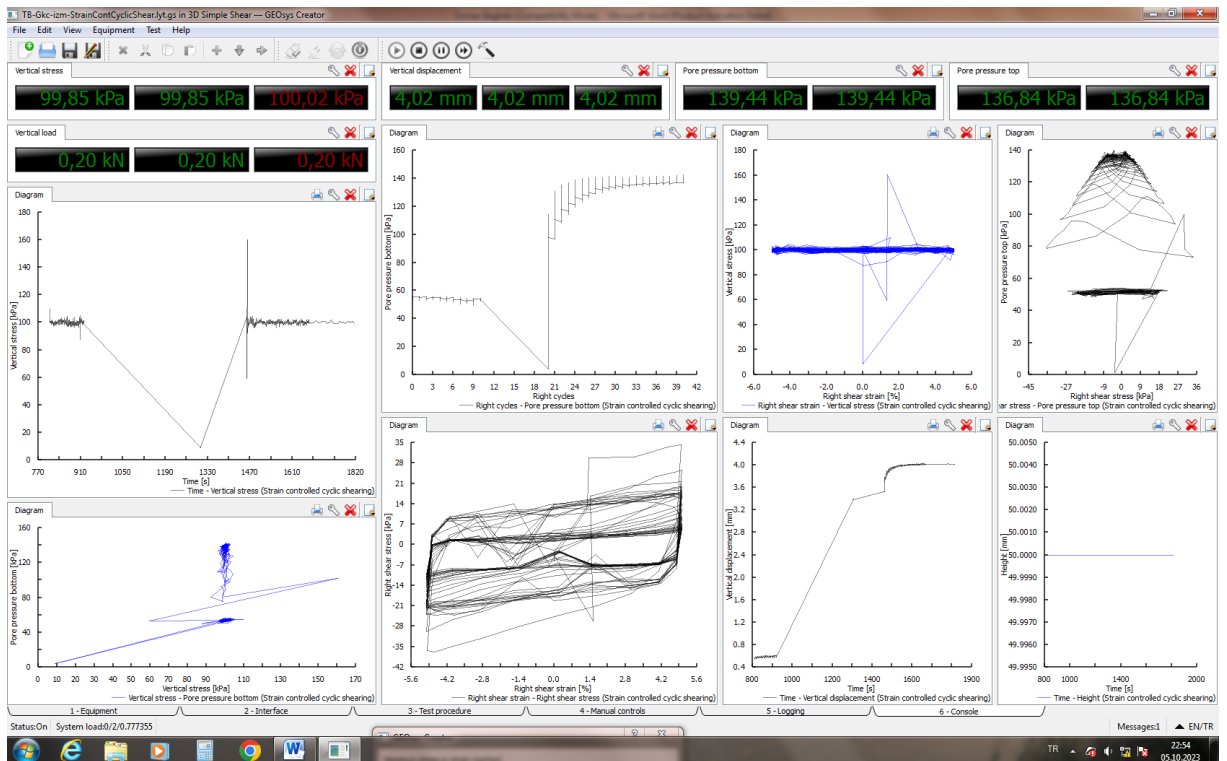
- Les résultats de S0F pour un contrainte normale de 200 KPa.



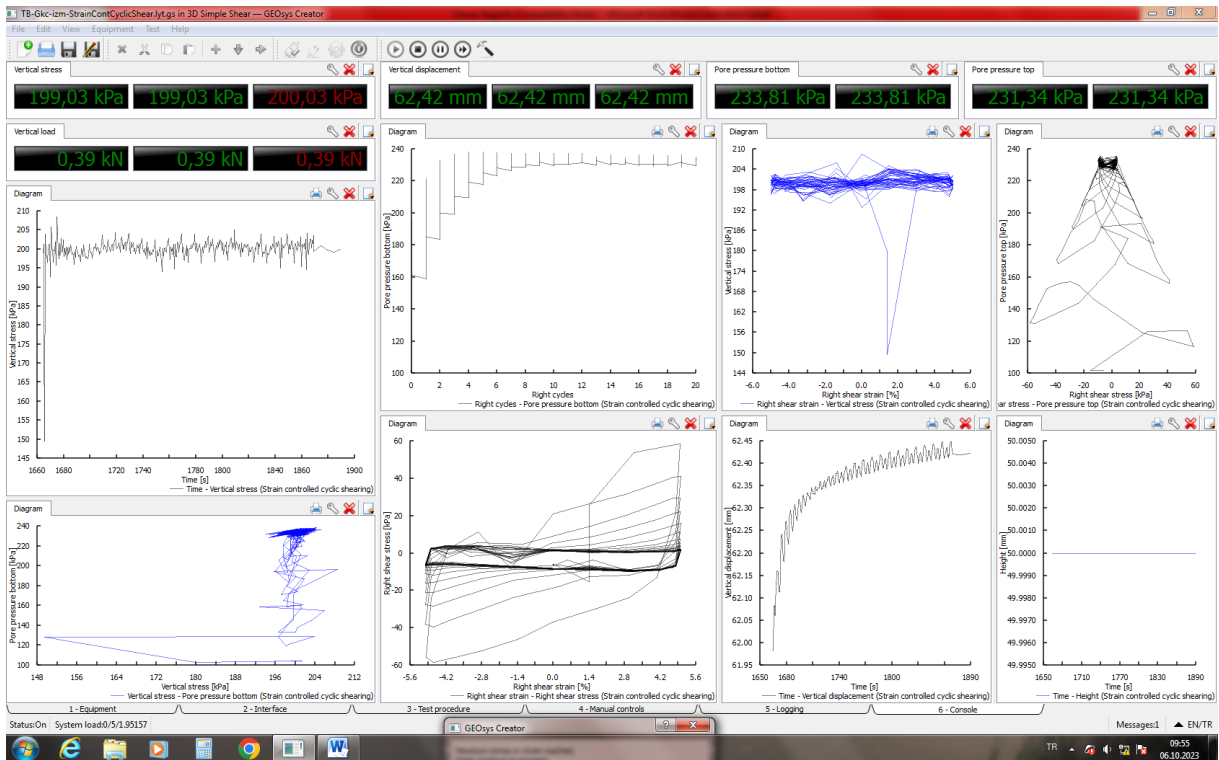
- Les résultats de S0.25F pour un contrainte normale de 50 KPa.



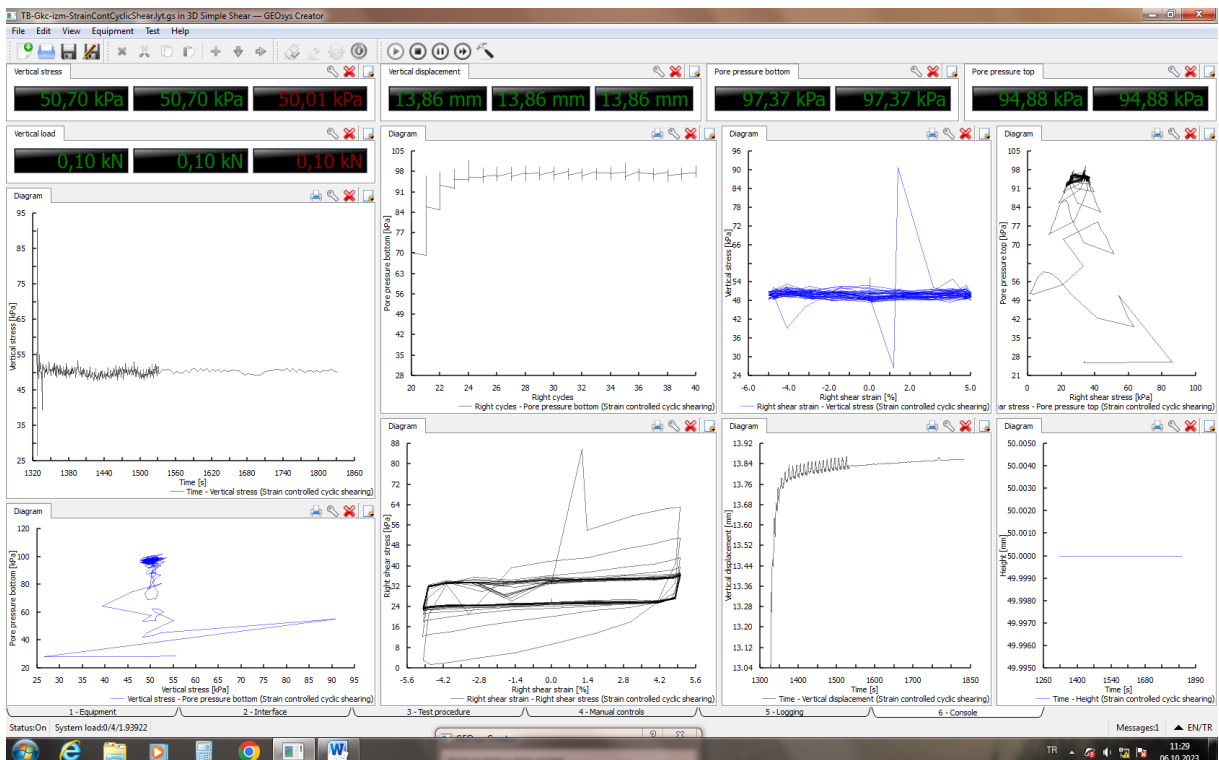
- Les résultats de S0.25F pour un contrainte normale de 100 KPa.



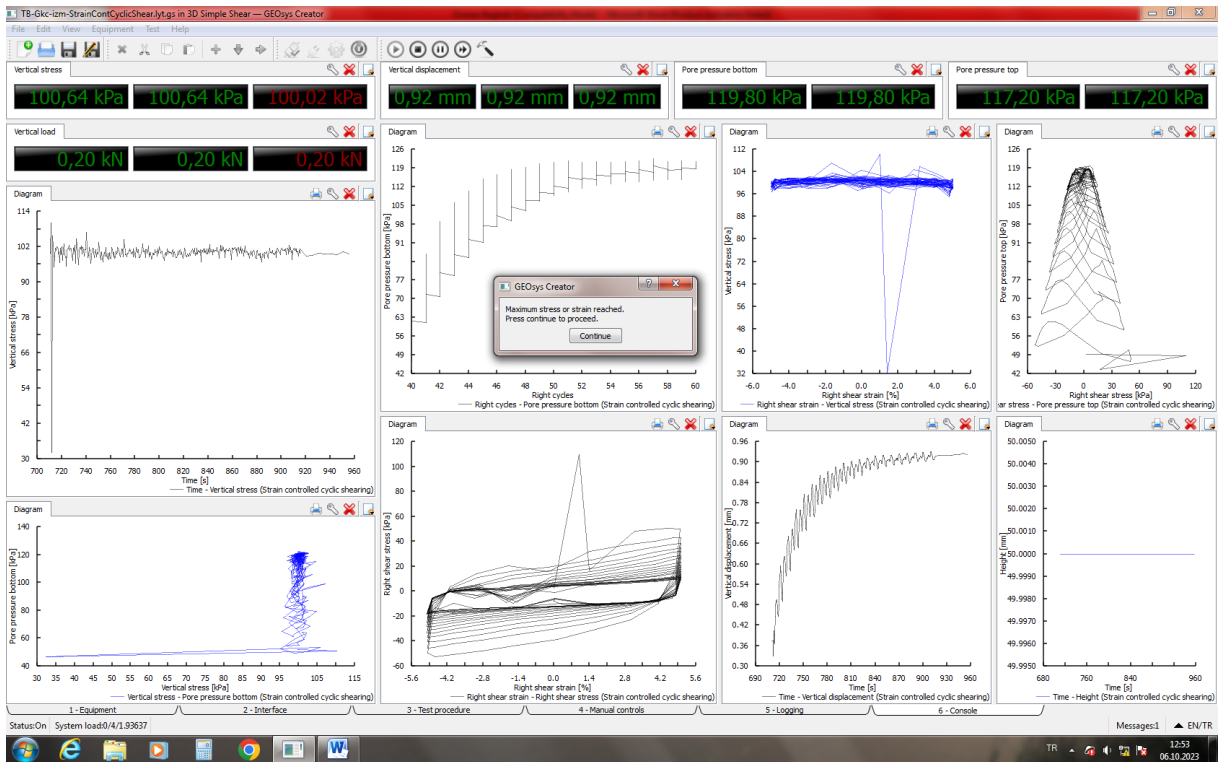
- Les résultats de S0.25F pour un contrainte normale de 200 KPa.



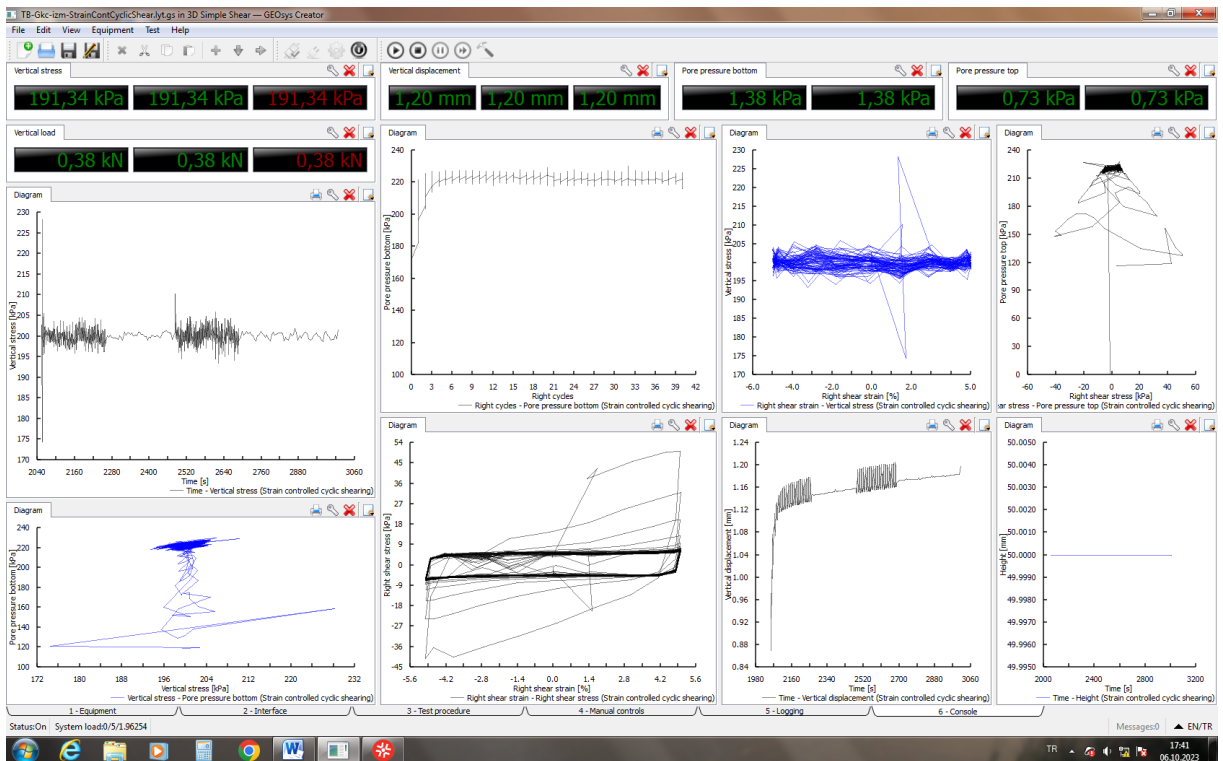
- Les résultats de S0.5F pour un contrainte normale de 50 KPa.



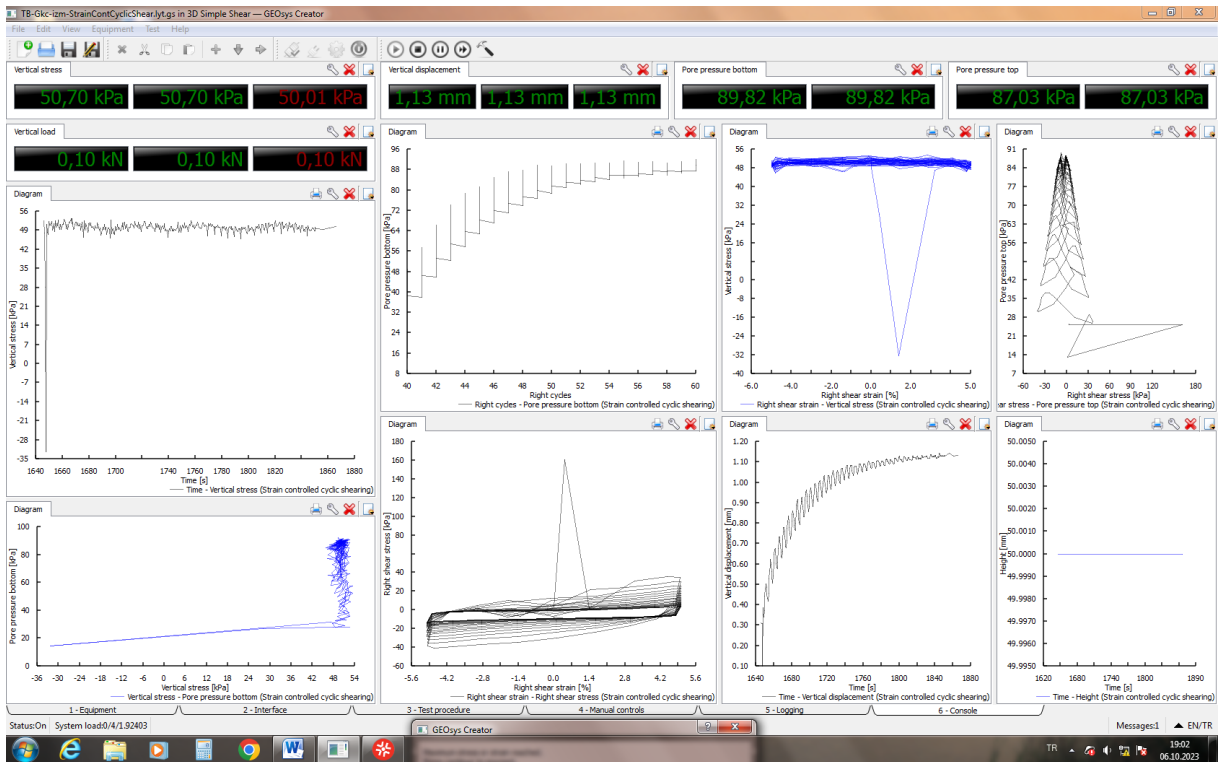
- Les résultats de S0.5F pour un contrainte normale de 100 KPa.



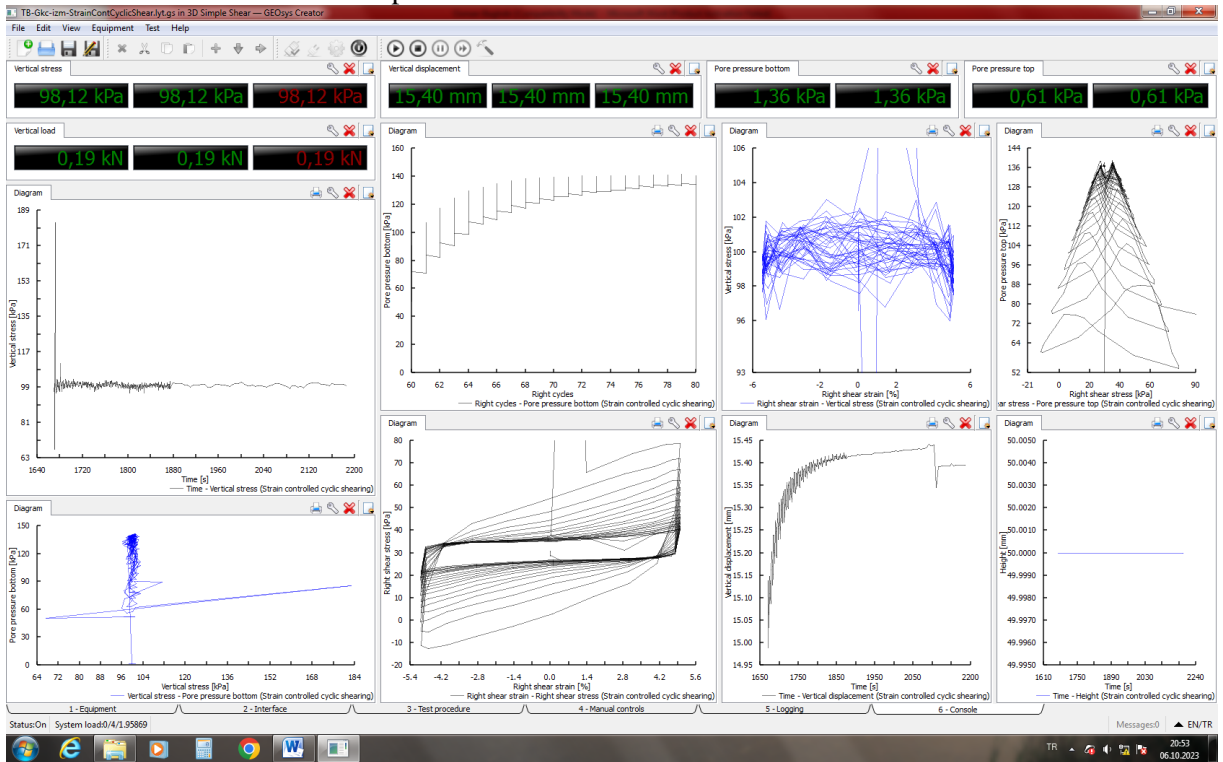
- Les résultats de S0.5F pour un contrainte normale de 200 KPa.



- Les résultats de S0.75F pour une contrainte normale de 50 KPa.

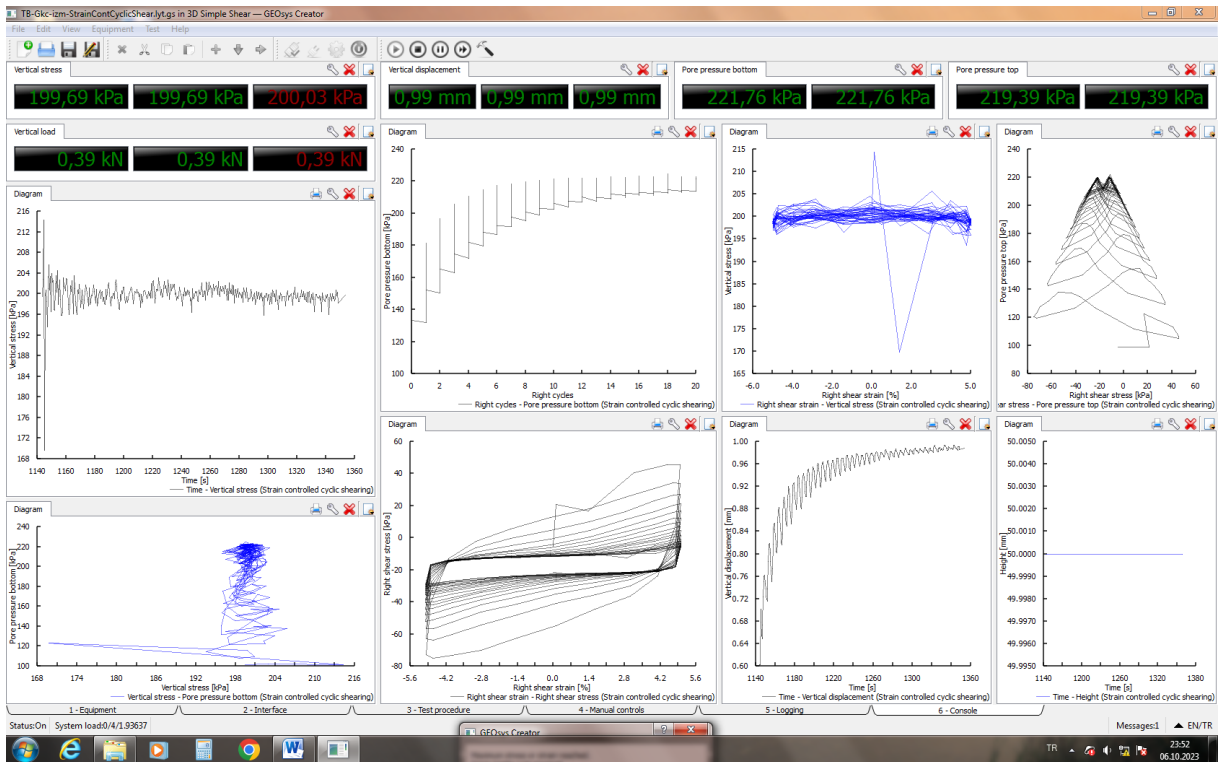


- Les résultats de S0.75F pour une contrainte normale de 100 KPa.

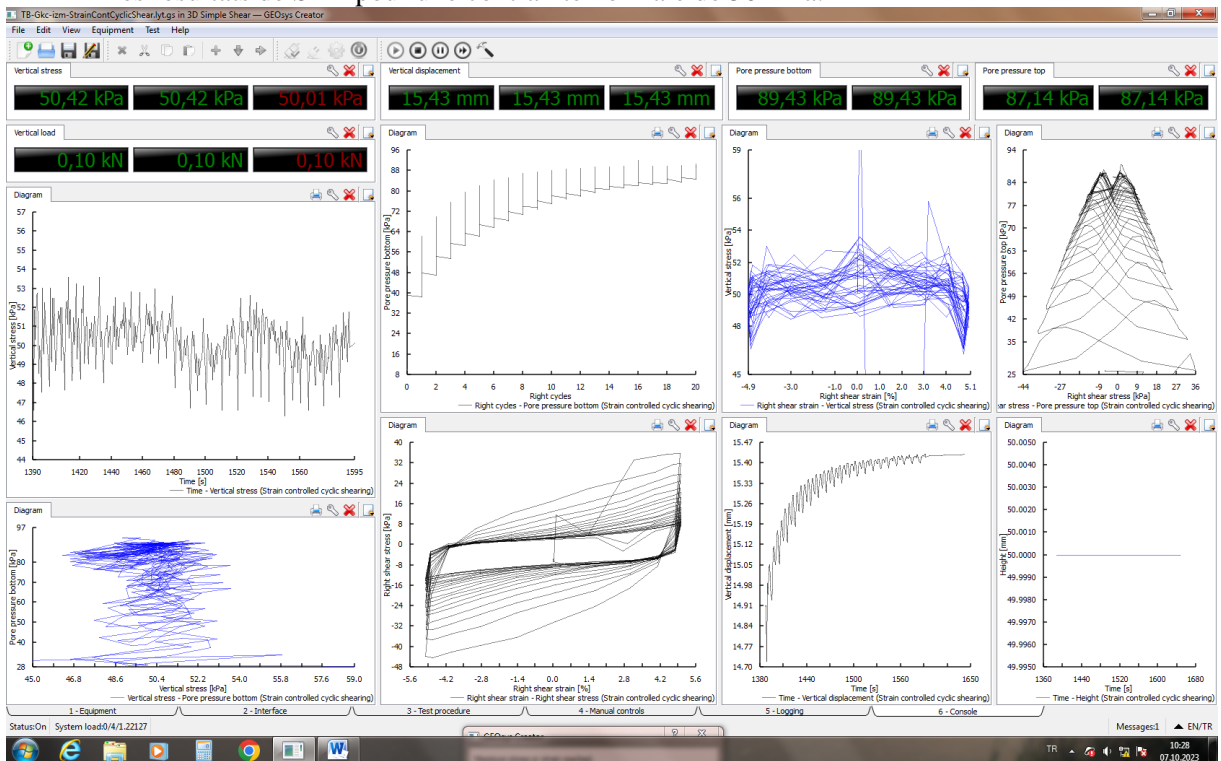


- Les résultats de S0.75F pour une contrainte normale de 200 KPa.

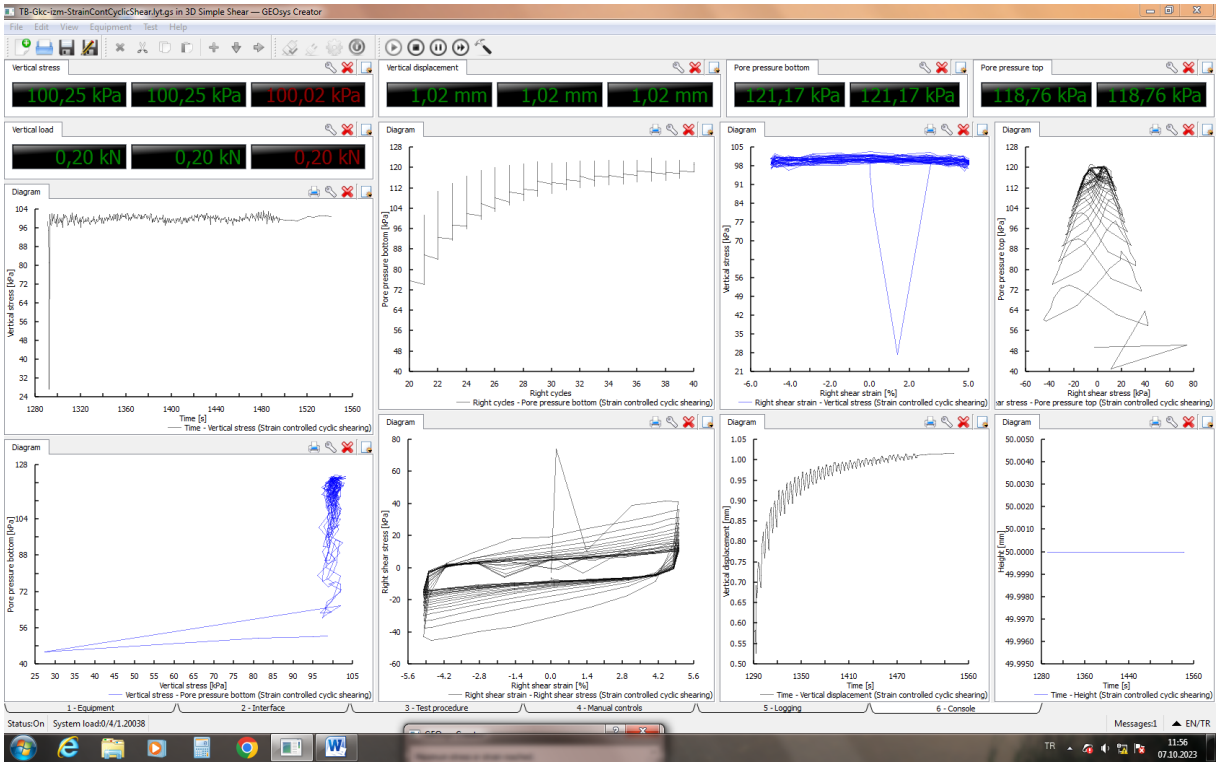




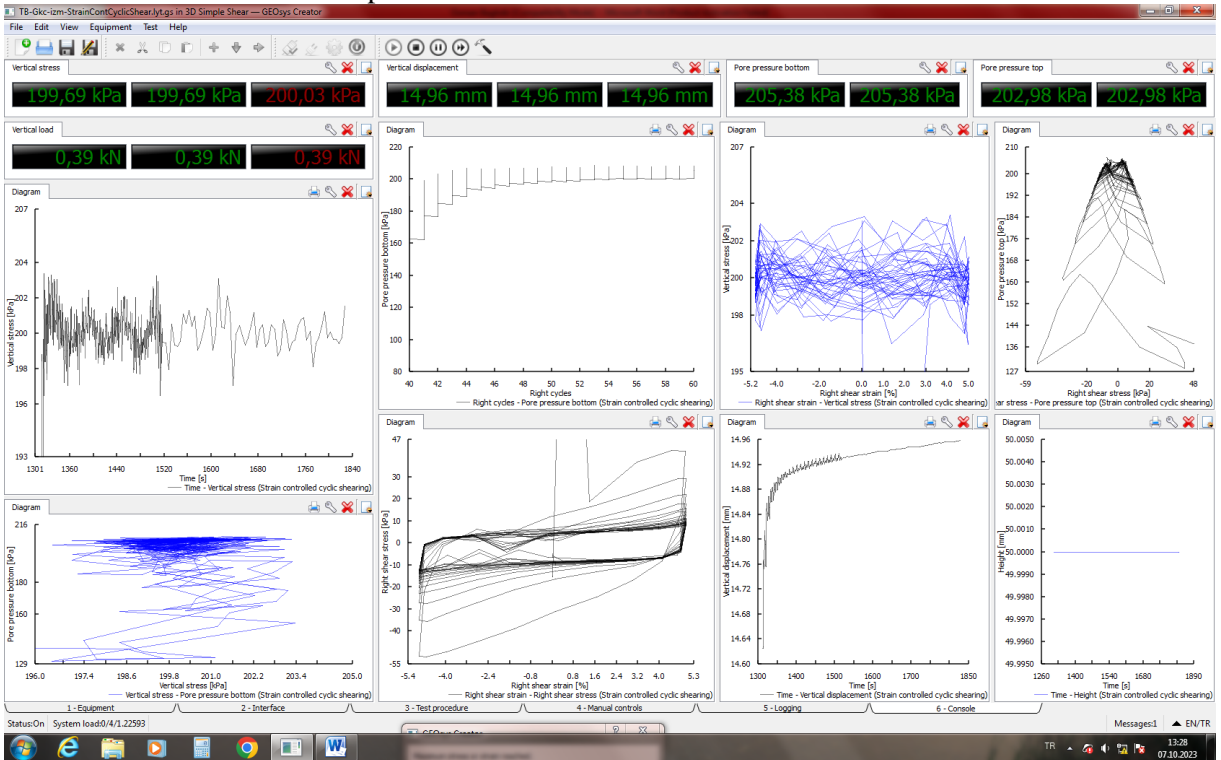
- Les résultats de S1F pour une contrainte normale de 50 KPa.



- Les résultats de S1F pour une contrainte normale de 100 KPa



- Les résultats de SIF pour une contrainte normale de 200 KPa



## REFERENCES

- A., A. M., Mohammadhasan, S., A., J. K., & L., A. S. (2024). The Role of Biopolymers in Enhancing Granular Media Shear Strength: A Comparative Analysis. In *IFCEE 2024* (pp. 108–118). <https://doi.org/doi:10.1061/9780784485415.012>
- A. Gajo and L. Piffer. (1999). The effects of preloading history on the undrained behaviour of saturated loose sand. *Soils and Foundations*, 39(6), 43–54. [https://doi.org/10.3208/sandf.39.6\\_43](https://doi.org/10.3208/sandf.39.6_43)
- Al-Refeai, T. O. (1991). Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, 10(4), 319–333. [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(91\)90009-L](https://doi.org/10.1016/0266-1144(91)90009-L)
- Alhassani, A. M. J. (2021). Improvement of sandy soil using materials of sustainable consideration. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 15(4), 623–632.
- Almajed, A., Lemboye, K., & Moghal, A. A. B. (2022). A Critical Review on the Feasibility of Synthetic Polymers Inclusion in Enhancing the Geotechnical Behavior of Soils. *Polymers*, 14(22), 1–37. <https://doi.org/10.3390/polym14225004>
- Anagnostopoulos, C. A., Papaliangas, T. T., Konstantinidis, D., & Patronis, C. (2013). Shear Strength of Sands Reinforced with Polypropylene Fibers. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(2), 401–423. <https://doi.org/10.1007/s10706-012-9593-3>
- Aouali, N. (2020). *ETUDE EN LABORATOIRE DE LA CONTRIBUTION DES GEOTEXTILES A L'AMELIORATION DE LA RESISTANCE DES SOLS LIMONEUX (EXPERIMENTATION ET MODELISATION)*. UNIVERSITE DE BLIDA 1.
- 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 Geological Engineering*, 37(2), 1047–1057. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0641-5>
- Arab, A., Sadek, M., Belkhatir, M., & Shahrour, I. (2014). Monotonic Preloading Effect on the Liquefaction Resistance of Chlef Silty Sand: A Laboratory Study. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(2), 685–694. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0700-4>
- Arab, Ahmed. (2009). Comportement monotone et cyclique d'un sable limoneux. *Comptes Rendus - Mecanique*, 337(8), 621–631. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2009.08.001>
- Arul, A., Teck-Ang, K., Chayakrit, P., Suksun, H., Farshid, M., & Miri, D. M. (2016). Spent Coffee Grounds–Fly Ash Geopolymer Used as an Embankment Structural Fill Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 4015197.

- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001496](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001496)
- Ayeldeen, M. K., Negm, A. M., & El Sawwaf, M. A. (2016). Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(5), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2366-1>
- Bagheri, P., Gratchev, I., & Rybachuk, M. (2023). Effects of Xanthan Gum Biopolymer on Soil Mechanical Properties. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/app13020887>
- Bahda, F. (2010). Etude du comportement du sable à l' appareil triaxial : expérience et modélisation. In *Thèse. L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES*.
- Baki, M. A. L., Cubrinovski, M., Stringer, M. E., van Ballegooy, S., & Ntritsos, N. (2023). Effects of partial saturation on the liquefaction resistance of sand and silty sand from Christchurch. *Soils and Foundations*, 63(6), 101400. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101400>
- Banne, S. P., Kulkarni, S., & Baldovino, J. A. (2024). Effect of Guar Gum Content on the Mechanical Properties of Laterite Soil for Subgrade Soil Application. *Polymers*, 16(15). <https://doi.org/10.3390/polym16152202>
- Becker, A., Katzen, F., Pühler, A., & Ielpi, L. (1998). Xanthan gum biosynthesis and application: A biochemical/genetic perspective. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 50(2), 145–152. <https://doi.org/10.1007/s002530051269>
- 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.
- Benessalah, I., Arab, A., Villard, P., Sadek, M., & Kadri, A. (2016). Laboratory Study on Shear Strength Behaviour of Reinforced Sandy Soil: Effect of Glass-Fibre Content and Other Parameters. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), 1343–1353. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1912-6>
- Benghalia, Y., Bouafia, A., Canou, J., & Dupla, J. C. (2015). Liquefaction susceptibility study of sandy soils: effect of low plastic fines. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(2), 605–618. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1255-0>
- 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>

- Berkane, H. A., Della, N., Denine, S., & Benziane, M. M. (2023). Incorporating vegetal fibers for sustainable sandy soil. *Revista de La Construcción*, 22(1), 135–146.  
<https://doi.org/10.7764/RDLC.22.1.135>
- Beycioglu, A., Science, A., Akmaz, E., & Sert, S. (2021). *Assessment of glass fiber-reinforced polyester pipe powder in soil improvement*. June.  
<https://doi.org/10.1007/s11709-021-0732-CITATIONS>
- Bouafia, A. (2007). *Introduction a la dynamique des sols*.
- Bouferra, R., Benseddiq, N., & Shahrour, I. (2007). Saturation and Preloading Effects on the Cyclic Behavior of Sand. *International Journal of Geomechanics*, 7(5), 396–401.  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)1532-3641\(2007\)7:5\(396\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1532-3641(2007)7:5(396))
- Casagrande. (1936). Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earthfills.pdf. *Boston Society of Civil Engineers*, 23(1), 13–32.
- Casagrande, A. (1975). Liquefaction and cyclic deformation of sands: A critical review. *Proceedings of the Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 88, 79–133.
- Chang, I., Im, J., Prasadhi, A. K., & Cho, G. C. (2015a). Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. *Construction and Building Materials*, 74(x), 65–72.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.026>
- Chang, I., Im, J., Prasadhi, A. K., & Cho, G. C. (2015b). Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. *Construction and Building Materials*, 74(October 2017), 65–72.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.026>
- Chang, I., Lee, M., Thi, A., Tran, P., Lee, S., & Kwon, Y. (2020). Review on biopolymer-based soil treatment ( BPST ) technology in geotechnical engineering practices Transportation Geotechnics Review on biopolymer-based soil treatment ( BPST ) technology in geotechnical engineering practices. *Transportation Geotechnics*, 24(June), 100385. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100385>
- Chang Ilhan, Prasadhi Awlia Kharis, I. J. (2015). Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers. *Construction and Building Materials*, 77, 430–438.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.116>
- Chen, L. (2008). Undrained and drained triaxial tests of fiber-reinforced sand. *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering - Geosynthetics Asia 2008: Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*, 114–120. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69313-0\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69313-0_25)  
<https://doi.org/10.1007/s11440-018-0641-x>
- Claria, J. J., & Vettorelo, P. V. (2016). *MECHANICAL BEHAVIOR OF LOOSE SAND*

- REINFORCED WITH SYNTHETIC FIBERS* Juan Jose Claria I and Paula Vanesa Vettorelo 2. 53(1), 11–15. <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9357-9>
- Daliri, K., Pfannkuche, K., & Garipcan, B. (2021). Effects of physicochemical properties of polyacrylamide (PAA) and (polydimethylsiloxane) PDMS on cardiac cell behavior. *Soft Matter*, 17(5), 1156–1172. <https://doi.org/10.1039/d0sm01986k>
- Dano, C. (2001). *COMPORTEMENT MECANIQUE DES SOLS INJECTES* [Université de Nantes]. <https://theses.hal.science/tel-01443014/document>
- Dehghan, H., Tabarsa, A., Latifi, N., & Bagheri, Y. (2019). Use of xanthan and guar gums in soil strengthening. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(1), 155–165. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1625-0>
- 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>
- Diambra, A., & Ibraim, E. (2015). Fibre-reinforced sand: Interaction at the fibre and grain scale. *Geotechnique*, 65(4), 296–308. <https://doi.org/10.1680/geot.14.P.206>
- Dos Santos, A. P. S., Consoli, N. C., & Baudet, B. A. (2010). The mechanics of fibre-reinforced sand. *Geotechnique*, 60(10), 791–799. <https://doi.org/10.1680/geot.8.P.159>
- Elroul, A. B., Della, N., Benziane, M. M., Bedr, S., Denine, S., Sert, S., & Bol, E. (2024). A Laboratory Study on Shear Behavior of Biocemented Chlef Sandy Soil. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11(2), 726–741. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00303-4>
- Erten, D., & Maher, M. H. (1995). Cyclic undrained behavior of silty sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14(2), 115–123. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(94\)00035-F](https://doi.org/10.1016/0267-7261(94)00035-F)
- F.Amini, G. Q. (2000). Liquefaction Testing of. *Manager*, 126(March), 208–217. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:3\(208\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:3(208))
- Ganiev, J., Yamada, S., Nakano, M., & Sakai, T. (2022). Effect of fiber-reinforcement on the mechanical behavior of sand approaching the critical state. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(4), 1241–1252. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.10.003>
- García-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A., & Gómez, E. (2000). Xanthan gum: Production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*, 18(7), 549–579. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1)
- Ghasemi Nezhad, M., & Tabarsa, A. (2023). An Experimental Study on the Mechanical

- 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>
- Goudarzy, M., Sarkar, D., Lieske, W., & Wichtmann, T. (2022). Influence of plastic fines content on the liquefaction susceptibility of sands: monotonic loading. *Acta Geotechnica*, 17(5), 1719–1737. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01283-w>
- Gray, B. D. H., & Ohashi, H. (1983). *Mechanics of fiber reinforcement in sand*. 109(3), 335–353.
- Green, V. S., & Stott, D. E. (2001). <P046-Green.pdf>. 384–389. [https://www.five-elements.com.au/resources/Polyacrylamide%2C A Review of the Use%2C Effectiveness%2C and Cost of a Soil Erosion Control Amendment.pdf](https://www.five-elements.com.au/resources/Polyacrylamide%2C%20A%20Review%20of%20the%20Use%20Effectiveness%20and%20Cost%20of%20a%20Soil%20Erosion%20Control%20Amendment.pdf)
- Grumezescu, V., Holban, A. M., Barbu, I., Popescu, R. C., Oprea, A. E., Lazar, V., Grumezescu, A. M., & Chifiriuc, M. C. (2016). Nanoarchitectonics Used in Antiinfective Therapy. In *Antibiotic Resistance: Mechanisms and New Antimicrobial Approaches*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803642-6.00007-1>
- Gu, J., & Chen, C. (2022). *Study on the impact of a biopolymer-fiber combination on soil reinforcement*. November. <https://doi.org/10.56028/aetr.3.1.65>
- Gul, N., Mir, B. A., & Saquib Wani, K. M. N. (2023). Mechanical Behavior of Silty Soil Reinforced with Carbon Fibers. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 297(January 2023), 307–315. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-6727-6\\_28](https://doi.org/10.1007/978-981-19-6727-6_28)
- Hao, S., Yu, Y., Song, J., Liu, J., Song, Z., Che, W., Huang, T., Chen, Z., & Sun, S. (2023). Study on direct shear strength properties of sand mixed with polyurethane prepolymer and sisal fiber. *Environmental Earth Sciences*, 82(19), 1–14.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-023-11121-9>
- Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., & Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 30, 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>
- Ingabire, E.-P., Clelland, L., Sy, A., Crippen Berger, K., & Ghafghazi, C. M. (2019). *Influence of Fines Content on Cyclic Resistance through the Critical State Framework*. September.
- Isazadeh-Khiav, B., Akhlaghi, T., & Hajjalilue-Bonab, M. (2022). Studying the Failure Behavior of Cement-fiber-treated Sand under Triaxial Direct Tension Tests. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(2), 384–397. <https://doi.org/10.3311/PPci.18469>
- Ishihara. (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique*, 43(3), 351–451. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.3.351>

- Ishihara, K., Tsuchiya, H., Huang, Y., & Kamada, K. (2001). Recent studies on liquefaction resistance of sand - effect of saturation. *Proceedings of 4th International Conference on Recent Advance in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 1–7.
- Jang, J., & Jia, P. (2020). A Review of the Application of Biopolymers on Geotechnical Engineering and the Strengthening Mechanisms between Typical Biopolymers and Soils. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020.  
<https://doi.org/10.1155/2020/1465709>
- Kaushik, D., & Singh, S. K. (2021). Use of coir fiber and analysis of geotechnical properties of soil. *Materials Today: Proceedings*, 47(xxxx), 4418–4422.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.255>
- 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>
- Kumar, S., Yadav, B. D., & Raj, R. (2024). A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil. *Discover Applied Sciences*, 6(8). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06087-7>
- Kurenkov, V. F., Hartan, H.-G., & Lobanov, F. I. (2002). Application of Polyacrylamide Flocculants for Water Treatment. *Ул. К. Маркса Казань. Татарстан. Россия*, 3(31), 31–40.
- Ladd, R. . (1978). Preparing Test Specimens Using Under compaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 16–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1520/GTJ10364J>
- Lade, P. V., & Yamamuro, J. A. (1997). Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), 918–928. <https://doi.org/10.1139/cgj-34-6-918>
- Lahaye, M. (2001). Developments on gelling algal galactans, their structure and physico-chemistry. *Journal of Applied Phycology*, 13(2), 173–184.  
<https://doi.org/10.1023/A:1011142124213>
- Latha, G. M., & Murthy, V. S. (2007). Effects of reinforcement form on the behavior of geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 25, 23–32.  
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.09.002>
- Lee, D. W., Lim, C., Israelachvili, J. N., & Hwang, D. S. (2013). Strong Adhesion and Cohesion of Chitosan in Aqueous Solutions. *Langmuir*, 29(46), 14222–14229.  
<https://doi.org/10.1021/la403124u>
- Lee, M., Im, J., Cho, G., Ryu, H. H., & Chang, I. (2021). *Interfacial Shearing Behavior along*



- Xanthan Gum Biopolymer-Treated Sand and Solid Interfaces and Its Meaning in Geotechnical Engineering Aspects*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app11010139>
- Lee, M., Kwon, Y. M., Park, D. Y., Chang, I., & Cho, G. C. (2022). Durability and strength degradation of xanthan gum based biopolymer treated soil subjected to severe weathering cycles. *Scientific Reports*, 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23823-4>
- Lee, S., Im, J., Cho, G. C., & Chang, I. (2019). *Laboratory triaxial test behavior of xanthan gum biopolymer - treated sands*. April. <https://doi.org/10.12989/gae.2019.17.5.445>
- Liu, X., Tian, C., & Lan, H. (2020). Laboratory investigation of the mechanical properties of a rubber-calcareous sand mixture: The effect of rubber content. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(18). <https://doi.org/10.3390/APP10186583>
- Ma, Q. (2023). *Enhance the mechanical properties of the ber- reinforced sandy soil using xanthan gum*.
- Maciej Serda, Becker, F. G., Cleary, M., Team, R. M., Holtermann, H., The, D., Agenda, N., Science, P., Sk, S. K., Hinnebusch, R., Hinnebusch A, R., Rabinovich, I., Olmert, Y., Uld, D. Q. G. L. Q., Ri, W. K. H. U., Lq, V., Frxqwu, W. K. H., Zklfk, E., Edvhg, L. V, ... 2013). (فاطمى, ح. Synteza i aktywność biologiczna nowych analogów tiosemikarbazonowych chelatorów żelaza. *Uniwersytet Śląski*, 7(1), 343–354. <https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- Maheshwari, K. V., Desai, A. K., & Solanki, C. H. (2011). Performance of fiber reinforced clayey soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 16 J, 1067–1082.
- Manfred.R, H. (1990). *Engineering principles of ground modification: International addition*. Mc-Graw and Hill Publishing. [https://books.google.ru/books/about/Engineering\\_principles\\_of\\_ground\\_modific.html?id=kHN8AAAAIAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.ru/books/about/Engineering_principles_of_ground_modific.html?id=kHN8AAAAIAAJ&redir_esc=y)
- Manson, J., Brabec, M. J., Buelke-Sam, J., Carlson, G. P., Chapin, R. E., Favor, J. B., Fischer, L. J., Hattis, D., Lees, P. S. J., Perreault-Darney, S., Rutledge, J., Smith, T. J., Tice, R. R., Working, P., & Shelby, M. (2005). NTP-CERHR expert panel report on the reproductive and developmental toxicity of acrylamide. *Birth Defects Research Part B - Developmental and Reproductive Toxicology*, 74(1), 17–113. <https://doi.org/10.1002/bdrb.20030>
- 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)
- Medina-Martinez, C. J., Sandoval-Herazo, L. C., Zamora-Castro, S. A., Vivar-Ocampo, R., &

- Reyes-Gonzalez, D. (2022). Natural Fibers: An Alternative for the Reinforcement of Expansive Soils. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(15).  
<https://doi.org/10.3390/su14159275>
- Michalowski, R. L. (2002). *Strength anisotropy of fiber-reinforced sand*. *29*, 279–299.
- Michalowski, R. L. (2015). *Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers Triaxial Compression of Sand Reinforced with Fibers*. *0241*(February 2003).  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129)
- Mir, B. A. (2020). Laboratory Study on the Effect of Plastic Waste Additive on Shear Strength of Marginal Soil. In V. S. Kanwar and S. K. Shukla (Ed.), *Sustainable Civil Engineering Practices* (Issue May). Springer Nature Singapore Pte Ltd.  
<https://doi.org/10.1007/978-981-15-3677-9>
- Mujah, D., Ahmad, F., Hazarika, H., & Safari, A. (2013). Evaluation of the mechanical properties of recycled glass fibers-derived three dimensional geomaterial for ground improvement. *Journal of Cleaner Production*, *52*, 495–503.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.035>
- Namjoo, A. M., Soltani, F., & Toufigh, V. (2021). Effects of Moisture on the Mechanical Behavior of Sand–Geogrid: An Experimental Investigation. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, *7*(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40891-020-00243-w>
- Nguyen, T. T., & Indraratna, B. (2023). Natural Fibre for Geotechnical Applications: Concepts, Achievements and Challenges. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(11).  
<https://doi.org/10.3390/su15118603>
- Niaounakis, M. (2015). Biopolymers: Applications and trends. In *Biopolymers: Applications and Trends*.
- Pecker, A. (1984). *Alain pecker*. L'école nationale des ponts et chaussées.
- Peddaiah, S., Burman, A., & Sreedeeep, S. (2018). Experimental Study on Effect of Waste Plastic Bottle Strips in Soil Improvement. *Geotechnical and Geological Engineering*, *October*. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0512-0>
- Phong Luong, M. (1978). Etat caracteristique du sol. *Comptes Rendus Hebdomadaires Des Seances de l'Academie Des Sciences, Serie B*, *287*(15), 305–307.
- Pramanik, S., Dutta, J., & Chakraborty, P. (2021). Development of pH-responsive interpenetrating polymer networks of polyacrylamide-g-gum arabica and sodium alginate for gastroprotective delivery of gabapentin. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, *83*(3), 473–482. <https://doi.org/10.36468/pharmaceutical-sciences.796>
- Qadir, D., Mohammad, S., & Paul, S. R. (n.d.). *FIBRE REINFORCEMENT OF SANDY SOIL*.

703–709.

- Qureshi, M. U., Chang, I., & Al-sadarani, K. (2017). *Strength and durability characteristics of biopolymer-treated desert sand*. May. <https://doi.org/10.12989/gae.2017.12.5.785>
- Robert D. Holtz, William D. Kovacs, T. C. S. (2023). *An introduction to geotechnical engineering* (Third edit). Hoboken, NJ: Pearson Education.
- Roux, C., & Robertson, J. (2000). FIBERS | Types. *Encyclopedia of Forensic Sciences*, 838–854. <https://doi.org/10.1006/rwfs.2000.0513>
- Sadek, S., Asce, M., Najjar, S. S., Asce, A. M., & Freiha, F. (2010). *Shear Strength of Fiber-Reinforced Sands*. March, 490–499.
- Safdar, M., Newson, T., & Qureshi, H. A. (2022). Shear strength of fibre reinforced cemented Toyoura sand. *AIMS Geosciences*, 8(1), 68–83. <https://doi.org/10.3934/geosci.2022005>
- Saini, K., Matsagar, V. A., & Kodur, V. R. (2024). Recent advances in the use of natural fibers in civil engineering structures. *Construction and Building Materials*, 411(December 2023), 134364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134364>
- Salimi, K., & Ghazavi, M. (2021). Soil reinforcement and slope stabilisation using recycled waste plastic sheets. *Geomechanics and Geoengineering*, 16(6), 497–508. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1683620>
- Seo, S., Lee, M., Im, J., Kwon, Y. M., Chung, M. K., Cho, G. C., & Chang, I. (2021). Site application of biopolymer-based soil treatment (BPST) for slope surface protection: in-situ wet-spraying method and strengthening effect verification. *Construction and Building Materials*, 307(September), 124983. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124983>
- Sherif, M. A., Tsuchiya, C., & Ishibashi, I. (1977). Saturation Effects on Initial Soil Liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(8), 914–917. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000477>
- Shibata, T., & Miyoshi, M. (1972). Liquefaction process of sand during cyclic loading. *Soils and Foundations*, 12(1), 1–16. <https://doi.org/10.3208/sandf1960.12.1>
- Shukla, Sanjay K., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2009). Fundamental concepts of soil reinforcement - An overview. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 3(3), 329–342. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2009.03.03.329-342>
- Shukla, Sanjay Kumar. (2017). Fundamentals of Fibre-Reinforced Soil Engineering. In *Developments in Geotechnical Engineering*.
- Sivadasan, S., & Sachan, A. (2016). Use of agar biopolymer to improve the shear strength behavior of sabarmati sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 10, 1–14. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1152674>

- Sojka, R. . (2003). SYNTHETIC- AND BIO-POLYMER USE FOR RUNOFF WATER QUALITY MANAGEMENT IN IRRIGATED AGRICULTURE. In U. Bruen, Michael (Centre for Water Resources Research, Civil Engineering Department (Ed.), *Diffuse Pollution Conference Dublin* (Vol. 3). Church Hill, Navan, Co. Meath, Ireland.
- Sojka, R. E., Bjorneberg, D. L., Entry, J. A., Lentz, R. D., & Orts, W. J. (2007). Polyacrylamide in Agriculture and Environmental Land Management. *Advances in Agronomy*, 92(May 2023), 75–162. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(04\)92002-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)92002-0)
- Song, P. S., Hwang, S., & Sheu, B. C. (2005). Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1546–1550. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.033>
- Sujatha, E. R. (2021). *Enhancing the geotechnical properties of soil using xanthan gum — an eco-friendly alternative to traditional stabilizers*. 1157–1167.
- Sujatha, E. R., & Saisree, S. (2019). Geotechnical behaviour of guar gum-treated soil. *Soils and Foundations*, 59(6), 2155–2166. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.11.012>
- Taha, M. M. M., Feng, C. P., & Ahmed, S. H. S. (2020). Influence of Polypropylene Fibre (PF) Reinforcement on Mechanical Properties of Clay Soil. *Advances in Polymer Technology*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9512839>
- Tatsuoka, F., & Ishihara, K. (1974). Drained Deformation of Sand Under Cyclic Stresses Reversing Direction. *Soils and Foundations*, 14(3), 51–65. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.14.3>
- Tronsoco, J. ., & Verdugo, R. (1995). Silt Content and Dynamic Behavior of Tailing Sand. *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1061–1064.
- Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Kamada, K., & Huang, Y. (2002). Resistance of partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities. *Soils and Foundations*, 42(6), 93–104. [https://doi.org/10.3208/sandf.42.6\\_93](https://doi.org/10.3208/sandf.42.6_93)
- Velde, K. Van De, & Kiekens, P. (2001). Ein Jahrhundert Bahnelektroindustrie. *Eb - Elektrische Bahnen*, 99(12), 483.
- Verma, A. K., Prasad, A., & Bonal, N. S. (2024). Geotechnical performance of municipal solid waste fines stabilized with xanthan gum and agar gum. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. <https://doi.org/10.1007/s10163-024-01993-9>
- Wang, L., Weng, Z., Liu, Q., Wang, T., Pan, X., Li, G., & Wang, Z. (2021). Improving the Mechanical Properties of Red Clay Using Xanthan Gum Biopolymer. *International Journal of Polymer Science*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/1535772>
- Wichtmann, T., Steller, K., & Triantafyllidis, T. (2020). On the influence of the sample preparation method on strain accumulation in sand under high-cyclic loading. *Soil*

- Dynamics and Earthquake Engineering*, 131(April 2018), 106028.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.106028>
- Wiśniewska, M., Chibowski, S., & Urban, T. (2016). Synthetic polyacrylamide as a potential flocculent to remove commercial chromium(III) oxide from aqueous suspension. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(2), 679–690.  
<https://doi.org/10.1007/s13762-015-0912-0>
- Y.H.Ling, K. T. L. (1992). Liquefaction of granular soils with non-cohesive and cohesive fines. *Earthquake Engineering, Tenth World Conference, 1992 Balkema*, 1491–1496.
- Yang, J. (2001). Saturation effects on horizontal and vertical motions in a layered soil-bedrock system due to inclined SV waves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(6), 527–536. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(01\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(01)00015-X)
- Yang, Jun. (2002). Saturation Effects of Soils on Ground Motion at Free Surface Due to Incident SV Waves. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(12), 1295–1303.  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2002\)128:12\(1295\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2002)128:12(1295))
- Yazici, M. F., & Keskin, S. N. (2024). Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced Clay Soil and Development of Predictive Models: Effects of Fiber Length and Fiber Content. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08688-7>
- Yoshimine, M., & Ishihara, K. (1998). Flow potential of sand during liquefaction. *Soils and Foundations*, 38(3), 189–198. [https://doi.org/10.3208/sandf.38.3\\_189](https://doi.org/10.3208/sandf.38.3_189)
- Zhang, X., Zheng, C., Xiong, K., Yang, K., & Liang, S. (2023). Effect of fiber type and content on mechanical properties of microbial solidified sand. *Frontiers in Materials*, 10(September), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1218795>