



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Djillali Bounaama de Khemis Miliana
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre
Département des Sciences de la Terre
Filière : Géologie appliquée
Spécialité : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Mémoire présenté pour l'obtention d'un diplôme de Master
En Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Thème

**Effet de fibre de polypropylène sur le
comportement mécanique d'un sable cimenté**

Réalisé par :

Mr. CHERGUI Mahdi
Mr. DJEMMAL Fayssal

Déposé le: 23/06/2022

Encadré par :

Dr. KHEBIZI Wiem MCB Université Khemis-Miliana Promotrice

Expertisé/examiné à distance par :

Dr. GADOURI Hamid MCA Université Khemis-Miliana Président

Dr. AISSA Mohamed Hemza MCB Université Khemis-Miliana Examineur

Année universitaire : 2021/2022

ملخص

تدعيم التربة بالألياف هو حل مثير للاهتمام ومبتكر لمشاكل الهندسة الجيوتقنية. تمت دراسة سلوك الرمال المقواة بالألياف على نطاق واسع والإبلاغ عنها في الأدبيات. أظهرت العديد من التجارب التي أجريت على الرمل المقوى بالألياف أن قوة الرمال تزداد عند إضافة الألياف المنفصلة إلى التربة. يتمثل دور التعزيزات في مصفوفة التربة في زيادة القوة وتقليل التشوه. تتمثل إحدى المزايا الأولى للتوزيع العشوائي للألياف في عدم وجود إمكانات مستوية ضعيفة يمكن أن تتطور بالتوازي مع اتجاه التعزيز. تقدم هذه الدراسة تحقيقاً مختبرياً لتقييم تأثير التسليح على رمال الشلف وهو رمل قابل للإسالة مع إضافة ألياف البولي بروبيلين ، وسيتم إجراء الاختبارات على عينات بنسبة ألياف تساوي 0% و 0.2% و 0.5% و 0.8%. تم إجراء العديد من الاختبارات لدراسة السلوك الميكانيكي Proctor، CBR، USC. أظهرت النتائج أن الكثافة الجافة بين 12% و 13 ويزداد CBR بحوالي 96% بينما تزيد نسبة UCS وفي الأخير، أكدت هذه النتائج أن زيادة الألياف يزيد من تقوية الرمل الإسمنتي بشكل ملحوظ.

الكلمات المفتاحية: الرمل ، التسليح ، ألياف البولي بروبيلين ، بروكتور ، CBR ، القوة غير المحصورة.

Abstract

Fiber soil reinforcement is an interesting and innovative solution for geotechnical engineering problems. The behavior of fiber-reinforced Sand has been widely studied and reported in the littérature. Many experiments performed on fiber-reinforced sand have shown that the strength of the sand increases when the discrete fibers are added to the soil.

The role of reinforcements in the soil matrix is to increase strength and reduce deformation. One of the first advantages of the random distribution of the fibers is the absence of the weak plane potential, which can develop in parallel the orientation of the reinforcement.

This study presents a laboratory investigation to evaluate the affect of reinforcement on chlef Sand, which Is a Sand susceptible to liquefaction with the addition of polypropylene fiber, the tests will be carried out on samples with a percentage of fiber equal to 0% and 0.2% and 0.5% and 0.8%. Several tests were carried out to study the mechanical behavior Proctor, CBR, USC.

The résultats showed That the dry density Is between 12% and 13 and the CBR increases by about 96% while the percentage of UCS increases. Finally, these results confirmed that the increase of fibers increases the cementé sand reinforcement significantly.

Keywords: sand, reinforcement, polypropylene fibers, Proctor, CBR, unconfined compressive strength.

Résumé

Le renforcement des sols par fibre est une solution intéressante et innovante pour les problèmes d'ingénierie en géotechnique. Le comportement des sable renforcés par des fibres a été largement étudiées et reporté dans la littérature. De nombreuses expériences réalisées sur sable renforcé de fibres ont montré que la résistance du sable augmente lorsque les fibres discrètes sont ajoutées au sol.

Le rôle de renforcements dans la matrice du sol est d'augmenter la résistance et réduire la déformation. L'un des premiers avantages de la distribution aléatoire des fibres sont l'absence du faible potentiel plane qui peut développer en parallèle l'orientation du renforcement.

Cette étude présente une investigation en laboratoire pour évaluer l'effet du renforcement sur le sable de chlef qui est un sable susceptible à la liquéfaction avec l'ajout de fibre de polypropylène, les essais seront réalisés sur des échantillons avec un pourcentage de fibre 0% et 0.2% et 0.5%et 0,8%. Plusieurs essais ont été effectués pour étudier le comportement mécanique Proctor, CBR, USC.

Les résultats ont montré que la densité sèche est comprise entre 12% et 13 et que le CBR augmente d'environ 96% tandis que le pourcentage d'UCS augmente. Enfin, ces résultats ont confirmé que l'augmentation des fibres augmente significativement le renforcement du sable de cimenté.

Mots clés: sable, renforcement, fibres polypropylène, Proctor, CBR, résistance non confinée.

Remerciement

Nous remercions «ALLAH» tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté de Poursuivre nos études.

Il n'est jamais facile de faire des remerciements, toujours peur d'oublier quelques noms ou des proches alors que nous vous prions de bien vouloir nous excuser si les lignes qui vont suivre vous paraissent incomplètes. Les gens qui nous entourent sont bien à quel point on les remercie.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre Encadreur madame «**KHEBIZI. W**», pour nous avoir Suivis et dirigé tout au long de ce travail.

Nous remercions également les membres du jury qui ont fait l'honneur d'apporter leur jugement critique sur cette étude «**Mr. Gadouri Hamid et Mr. Aissa Mohammed Hemza**»

Nous remercions les chefs de laboratoire (MAPA) **Mr Mustapha et Mr boualem** et **Mr lamin** et tout les travailleurs pour leur aide.

Nous remercions nos parents et toute la famille, tous les amis pour leurs encouragements.

A tous ceux qui liront cette mémoire, je lui demande de prier pour la miséricorde pour mon grand-père chergui kadourd et la grand-mère de mon collègue djemmal fayssal.

ALLAH, aie pitié de notre ami, notre père Aboun abdellatife, et mets-le dans un paradis spacieux amine

DEDICACE

A mon très cher père qu'il a su se faire sentir dans les moments difficiles ainsi que chaque instant de bonheur qu'il m'a procuré.

A ma très chère mère qui je ne saurai remercier assez pour les sacrifices qu'elle a consentis pour moi.

A mes frères Karim et Abderrahmane et ma sœur.

à toute sa famille. La famille chergui a ma grand mère Mama aicha A mon grand-père, que allah lui fasse miséricorde

A mon binôme fayssal djemmal

A mes amis. Qui ont grandi avec moi depuis l'enfance kalouch cherif ,baghdad siefeldine , kamal chergui, tizan ossama , tokyo rahim , kalouch dilmi , amo rachid , khaled ghabriwa

Khaled ghabriwia , daka chorba

A mes amis de groupe TOUTA maghraoui djilali , mekki med nadir , ishak, khalde hassan ,mohamed, fargougi ,malek ,taybe, banouba ,aymen ,youcef ,ahmed fatah, younes, 'amine el zabana' , ssdik, ninouche pacht, youcef, hamza, aziz babaha ,daloucha, belkacem ,ninouche , Abdelkader

Et ma promotion (2022).

Et à toute personne qui j'ai connu et qui j'ai aimée.

Chergui mahdi

DEDICACE

A mon très cher père qu'il a su se faire sentir dans les moments difficiles ainsi que chaque instant de bonheur qu'il m'a procuré.

A ma très chère mère qui je ne saurai remercier assez pour les sacrifices qu'elle a consentis pour moi.

A mes frères et me sœurs.

à toute sa famille. La famille djemmal et zouaoui

A mon binôme chergui mahdi

A mes amis. salmi Hicham , bensalah abdelrahmen, hama benhwadjeb , mourad belarbi, mohammed , samir sadon, mustapha touria , meliani , sida li bengouffa , laib mohammed, benyaghzer daka , walid djemmal a tout mes amis

Et ma promotion (2022).

Et à toute personne qui j'ai connu et qui j'ai aimée.

Allah aie pitié de notre ami, notre père abbone Abdellatif, et mets-le dans un paradis spacieux amine

Fayssal djemmal

Liste des figures

Chapitre I: Les techniques D'amélioration des sols

Fig. I.1. - Schéma général de l'application des techniques d'amélioration des sols.....	4
Fig. I.2 technique de compactage dynamique.....	5
Fig. I.3: Principe de vibrocompactage.....	6
Fig. I.4: Principe d'injection solide injection solide.....	7
Fig. I.5 : Principe de drainage vertical.....	7
Fig. I.6: Technique de rabattement de nappe.....	8
Fig. I.7: Drainage de fouille par rabattement de nappe.....	8
Fig. I.8. Traitement des sols à la chaux.....	9
Fig. I.9. Traitement des sols au Ciment.....	10
Fig. I.10: Principe d'injection de colonnes ballastées	11
Fig. I.11 : Jet grouting Soil crete.....	12
Fig. I.12 : Géotextile (Giroud. J. P, 1981).....	12
Fig. I.13 : Terre armée.....	13
Fig. I.14. Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013)....	15
Fig. I.15 . Fibres de polypropylène.....	16

Chapitre II: Influence des fibres sur le comportement mécaniques des sables améliorés

Figure II.1 Constitution d'une structure de chaussées.....	19
Figure II.2 . Chaussées souples.....	19
Figure II.3 . Chaussées bitumineuse épaisse	20
Figure II.4. Chaussées semi-rigid.....	20
Figure II.5. Chaussées à structure mixte.....	20
Figure II.6. Chaussées à structure inverse.....	21
Figure II.7 . Dégradation d'arrachement.....	22
Figure II.8. L'orniérage.....	22
Figure II.9. Renfort fibreux	25

Figure II.10. Valeurs du California Bearing Ratio pour les spécimens d'argile renforcée avec différentes teneurs en fibres	26
Figure II.11. Augmentation en pourcentage et CBR réel par rapport à la quantité de ciment et de fibres.....	28
Figure II.12 Effet de la stabilisation sur le CBR du sol.....	29

Chapitre III: Dispositif expérimental et mode opératoire

Fig. III.1 Sable naturel utilisé.....	33
Fig. III.2: Courbe granulométrique du sable naturel utilisé.....	34
Fig. III.3 : Fibre de polypropylène utilisée dans les essais.....	36
Fig. III.4 Matériel utilisé.....	37
Fig. III.5 MODE OPERATOIRE.....	38
Fig. III.6 : appareil de mesure CBR.....	39
Fig. III.7 Matériels utilisés CBR	40
Fig. III.8 : Mode opératoire.....	41
Fig. III.9 : L'appareil pour UCS.....	43
Fig. III.10 Dessiccateur.....	43
Fig. III.11 Préparations des mélanges	44
Fig. III.12 Préparations des éprouvettes	45
Fig. III.13 Manipulations de l'essai UCS.....	45
Fig. III.14 : Essai UCS 14 ,7 jours	46

Chapitre IV: Présentation et discussion des résultats

Fig.IV 1 Variation de ouve compression force courbes pour le sable avec fibres (pp)	48
Fig. IV 2 Variation de ouvert la teneur en fibre avec la densité séché maximale... ..	48
Fig. IV 3 Variation de ouvert la teneur en fibre avec la teneur en Léau	49
Fig. IV.4. Effet du fibre PP sur le comportement du sable au poinçonnement immédiat... ..	50
Fig. IV.5 Effet de l'ajout de PP sur le CBR du sol traité à l'état Immédiat.....	50
Fig. IV.6 Effet de l'ajout de PP sur le CBR du sable traité à l'état Immédiat.....	51

Fig. IV.7 Effet de l'ajout de PP dans UCS du sable (7J).....	52
Fig. IV.8 Effet de l'ajout de PP dans UCS du sable (7J).....	52
Fig. IV.9 Effet de l'ajout de PT et ciment dans UCS du sable (14J).....	53
Fig. IV.10 Effet de l'ajout de PT et ciment dans UCS du sable (14J).....	54
Fig IV.11 : Effet de cure sur l'ajout de PP	55
Fig. IV.12 Indice de déformations (7j, 14j) avec pourcentage de fibre	56
Fig IV.15 : module d'élasticité en fonctions de pourcentage de fibre à 7, 14 jours	56
Fig IV.16 : plan de rupture après écrasement d'essai UCS après 7 jours.	59
Fig IV.17 : Plan de rupture après écrasement d'essai UCS après 14 jours	60

Liste des Tableaux

Tableau I.1. Les caractéristiques mécaniques et physiques des fibres polypropylène.....	17
Tableau II.1: classes principales dans le GTR.....	29
Tableau III.1: Propriétés du sable naturel utilisé.....	32
Tableau III.2 montrent les caractéristiques physique mécanique chimiques du ciment.....	33
Tableau III.3: Propriétés de la fibre de polypropylène.....	35
Tableau III.4. Détails de sol mélanges.....	37
Tableau III-6 .Différentes classes de portances.....	41
Tableau IV.1 : Caractéristique de compactage du sable naturel utilisé.....	47
Tableau IV.2. Résultats des essais CBR.....	40
Tableau IV.3 Indice de déformations (7j, 14j)	56
Tableau IV.4. Variation de sécante tangente module d'élasticité.....	58

Liste des notations

D₁₀, D₃₀, D₅₀, D₆₀	dimension auxquelles sont inférieurs respectivement 10%, 30%, 50%, 60%.
e	indice de vide.
e_{min}	indice de vide minimal
e_{max}	indice de vide maximal
UCS	unconfined compressive strength (kPa)
W_c	poids de ciment (g)
W_f	poids de fibre (g)
W_{opt}	<i>la teneur en Léau optimal</i> (dimensionless) (%)
W_s	poids de sable utilise (g)
σ	contraint appliquée (Kpa)
E	module de Young (Kpa)
ε	déformations

Table des Matières

ملخص

Abstract

Résumé

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des notations

Table des Matières

Introduction Générale 1

Chapitre I: Les techniques D'amélioration des sols

I.1 Introduction :	2
I.2 Les techniques d'amélioration des sols :	2
I.3 Domaines d'application des techniques d'amélioration des sols :	3
I.3.1 Amélioration de sol par compactage:	4
I.3.1.1 Compactage par explosifs :	4
.....	
I.3.1.2 Compactage dynamique :	4
.....	
I.3.1.3 Vibrocompactage :	5
I.3.1.4 Le compactage statique horizontal par injection solide :	6
I.3.2 Amélioration de sol par Drainage:	7
I.3.2.1 Drains verticaux:	7
I.3.2.2 rabattement de nappe:	8
I.3.3 Amélioration de sol par Traitement :	9
I.3.3.1 Traitement des sols à la chaux :	9
I.3.3.2 Traitement par ciment :	10
I.3.4 Amélioration de sol par renforcement:	10
I.3.4.1 Colonnes ballastées:	10

I.3.4.2 Jet-grouting :	11
I.3.4.3 Amélioration par Géotextile:	12
I.3.4.4 Renforcement par armature métalliques (Terre Armée) :	13
I.3.4.5 Renforcement par des fibres :.....	14
I.4 Histoire de renforcement des sols par fibre :.....	15
I.5 Les Fibres Naturelles :.....	15
I.6 Fibres synthétiques :.....	15
I.7 LES FIBRES DE POLYPROPYLENE :	16
I.7.1 LES CARACTERISTIQUES MECANQUES	16
ET PHYSIQUES DES FIBRES DE POLYPROPYLENE	
I.8 Conclusions :	17

Chapitre II: Influence des fibres sur le comportement mécaniques des sables améliorés

II. 1 Introduction :	18
II.2 Constitution d'une structure déchaussée	18
II.2.1 Chaussée souple	19
II.2. 2 Chaussée bitumineuse épaisse	19
II.2.3 Chaussée semi-rigide	20
II.2. 4 Chaussée mixte	20
II .2. 5 Chaussée a structure inverse :.....	21
II.2. 6 Chaussée rigide	21
II.3 Les dégradations des chaussées	21
II.3.1 Les dégradations d'arrachement	21
II.3.2 Les mouvements de matériau	22
II.3.3 Les dégradations de déformation	22
II .3.4 Les fissures	23
II.4 Atténuation à la liquéfaction	23
II.4 Stabilisation et renforcement des sols.....	24
II.4.1 Ciment stabilisation	24
II.4.3 Renforcement des fibres et stabilisation du ciment	26
II.5 Les paramètres géotechniques des sols et le compactage	26
II.5.3 Avantages d'utilisations de fibre dans le renforcement	29

I.5.1 Classification GTR et norme NF P 11-300 :.....	30
I.5.1.1 Les paramètres de comportement mécanique	30
I.5.1.2 Compactage	31
II.6 Conclusion :	32

Chapitre III: Etude expérimentale

III.1 Introduction :.....	33
III.2 matériaux utilisés :.....	33
III.2.1 Sable :.....	33
III.2.2 Les ciments utilisés 32.5 :	35
III.2.3 Fibre :.....	35
III.2.4 Calcule Le poids pour fibre ciment et Léau :.....	36
1) Poids de fibre :.....	36
2) Poids de ciment :.....	36
III.3 Essais réalisés : (NF P98-093).....	37
III.3. 1 Essai Proctor normal :	37
III.3.2 Essai C.B.R immédiat : (NF P94-093).....	39
III.3.3 Essais UCS : (NORME ASTM D2166).....	42
III.3.3.1 Dessiccateur :.....	43
III.4 CONCLUSION :.....	46

Chapitre IV: Présentation et discussion des résultats

IV.1 Introduction :	47
IV.2 Comportement du sable cimenté renforcé par de fibre.....	47
sur les caractéristiques du compactage :	
IV.2.1 Effet de fibre sur les caractéristiques du compactage :.....	47
IV.2.2 Effet de fibre sur la densité séché maximale :.....	48
IV.2.3 Effet de fibre sur la teneur en eau optimale :.....	49
IV.3 Effet de fibre de polypropylène sur CBR :.....	49

IV.4 Effet de fibre de polypropylène sur la résistance	52
à la compression non confiné (UCS):	
IV.4.1 Résistance à la compression non confiné à 7 jours :.....	52
IV.4.2 Résistance à la compression non confiné à 14 jours :.....	53
IV.4.3 Effet de cure :.....	55
IV.4.4 Indice de déformation :.....	55
IV.4.5 Module d'élasticité (initiale tangente module) :.....	57
IV.4.5.1 module d'élasticité et la teneur en fibre a 7, 14 jours :.....	58
IV.5 Déformation finale des éprouvettes après écrasement :.....	59
IV.6 Conclusion :.....	61
Conclusion générale	62

Introduction Générale

L'inclusion de fibres dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques des sols compactés devient de nos jours une pratique courante dans les projets d'ingénierie géotechnique. (Gregory et Froid, 1998) la réalisation de remblais à faibles caractéristiques mécaniques, la réduction des fissures de retrait dans les revêtements des sols compactés (Rifai, 2000), l'amélioration de la stabilité des murs de soutènement en terre (Park et Tan, 2005), ou au renforcement des chaussées présentant des dégradations avancées sous l'effet du trafic ou de facteurs environnementaux: climat, érosion, eaux d'infiltration (Santoni et al., 2001) . La région de Chlef représente un vaste chantier de renforcement des sols par ce procédé d'ajout de fibres dans des sols médiocres, compte tenu de la sismicité de la région, ayant entraîné la dégradation de beaucoup d'infrastructures ; l'instabilité des sols de neuf sites urbains, la dégradation de tronçons routiers et de barrages, ainsi que des déplacements de rails de chemin de fer.

Le caractère vulnérable de ces sols a conduit plusieurs chercheurs à se mobiliser dans le but d'apporter des solutions adéquates à ces problèmes. Nous citerons par exemple parmi les travaux dans le domaine du renforcement et de l'amélioration des sols : Gray et Al- Refeai (1986) ; Maher et Gray (1990); Consoli, et al. (2003) et Tang et al. (2010). En général, les études montrent que l'addition de fibres augmente la résistance aux grandes déformations du sol renforcé. Cependant dans la littérature existante et récente seules quelques études ont traité de l'effet de l'inclusion de fibres de polypropylène sur le comportement mécanique des sols renforcés.

Notre travail comporte une étude expérimentale sur l'effet de l'ajout de fibres de polypropylène sur le comportement de sable cimenté renforcé et non renforcé,

L'objectif principal de ce travail est d'étudier expérimentalement les propriétés mécaniques de sable cimenté de la région de Chlef renforcés par différent pourcentage de fibres de polypropylène. Bien que des recherches antérieures sur le renforcement des fibres se soient concentrées sur l'effet de la teneur en fibres et de la géométrie des fibres sur la résistance des sols renforcés, l'influence d'autres facteurs (type de sol, arrangement des fibres) mérite d'être étudiée plus en détail. Des essais (UCS) compression simple ont permis de tester les éprouvettes du sable cimenté/fibre à deux période de cure 7 jours et 14 jours. Les objectifs fixés dans cette étude sont les suivants :

- Quantifier la possibilité d'améliorer les caractéristiques de résistance et de déformation des sables avec l'ajout de fibres et du ciment.

- Étudier l'influence de fibre (PP), avec différents pourcentages (00%, 0,2%, 0,5%, 0,8%) sur l'essai Proctor normal et essai CBR pour mesurer la portance de sol.
- Explorer la possibilité d'améliorer la réponse des sables sur la résistance de la compression simple non confiné (UCS).

Notre mémoire est structuré comme suit :

Chapitre 01 est consacré entièrement sur une synthèse bibliographique axée sur les différentes techniques d'amélioration des sols.

Chapitre 02 comporte une synthèse bibliographique sur l'identification des chaussées, leurs types et les dégradations, aussi une littérature sur l'effet de fibre sur le comportement du sable.

Chapitre 03 donne un aperçu sur les matériaux utilisés sable, ciment et fibre ainsi que les différents dispositifs expérimental et le mode opératoire effectués en laboratoire de MAPA à Djendel wilaya Aïn Defla.

Chapitre 04 contient tous les résultats et discussion des essais du sol renforcé et non renforcé.

Enfin comme toute recherche expérimentale, ce mémoire nous permet de faire le point sur les résultats obtenus et de tirer les conclusions nécessaires sur l'amélioration du sol d'envisager quelques perspectives pour la valorisation de notre travail.

Chapitre I:
Les techniques
D'amélioration des
sols

I.1 Introduction :

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

I.2 Les techniques d'amélioration des sols :

Lorsque les sols posent des problèmes de tassements, de portance ou de liquéfaction pour un ouvrage, les améliorations et les renforcements du sol sont en général la première option à étudier, car ils peuvent permettre de préserver le mode de fondation le plus économique et le plus simple à mettre en œuvre, à savoir les fondations superficielles.

Il existe plusieurs techniques servant de valoriser les sols présentant des mauvaises caractéristiques géotechniques. Ces différentes techniques d'amélioration permettent d'augmenter la densité du sol, de diminuer ou augmenter la perméabilité, de réduire la compressibilité, de minimiser la sensibilité à l'eau, de modifier la fraction argileuse, ou de changer le comportement du sol par traitement. Il s'agit de la stabilisation

- par le remplacement du sol (remplacement du mauvais sol par le bon) ;
- mécanique (compactage de surface, compactage dynamique, vibrocompactage...etc.) ;
- chimique (ajouts de produits minéraux: chaux, ciment, pouzzolane naturelle, fumé de silice, cendres volantes, laitier...etc.) ;
- par renforcement du sol (terre renforcé, matériaux synthétiques...etc.) ;
- par substitution ou inclusion souples constituées de gravier (colonnes ballastées, inclusion solide...etc.) ;
- hydraulique (drainage, rabattement de la nappe...etc.) ; (Cours : Dr. GADOURI. H).

I.3 Domaines d'application des techniques d'amélioration des sols :

Le sol initial, ou à l'état non amélioré, est identifié essentiellement par sa courbe granulométrique qui demeure un facteur essentiel en vue de lui faire subir une technique d'amélioration donnée. En effet, compte tenu des deux grandes classes de sols bien connus, à savoir pulvérulents ou fins, on comprend naturellement qu'il existe une différence entre les techniques d'amélioration appropriées à chacune de ces classes. Par ailleurs, en plus, sachant qu'il existe une bonne majorité de sols appartenant à la catégorie de sols intermédiaires, d'autres dérivées de techniques peuvent être envisagées. En effet, illustre la différence nette entre les techniques exécutables dans les sols fins, d'une part, et dans les sols grenus, d'autre part. Alors que pour les sols intermédiaires les possibilités d'amélioration ne se sont diversifiées.

sols organiques caractérisés par des teneurs élevées en eau naturelle, une solution de colonnes chaux - ciment incorporées par voie sèche est techniquement adaptée ; lorsque la teneur en eau naturelle est faible L'expérience acquise dans le domaine de traitement des sols nous a permis de tirer les conclusions suivantes (Dhouib et Liausu, 2005) :

Il est possible de procéder à des compactages dynamique, statique (dit aussi compactage horizontal statique : CHS) ou par vibration radiale (vibroflottation ou vibrocompactage), ou d'effectuer des colonnes de mortier sol- ciment (Jet- Grouting) dans des matériaux sablo-graveleux plus ou moins fins.

Lorsque les sols à compacter présentent un fuseau granulométrique des sols fins à très fins, à la limite des procédés de compactage correspond le début de l'application des techniques de colonnes ballastées, d'inclusions rigides et de colonnes de sol chaux- ciment. Il demeure évidemment que la réalisation des colonnes ballastées est subordonnée à l'existence d'une étreinte latérale suffisante et pérenne mobilisable par le milieu traité pour éviter l'expansion latérale du ballast dépourvu de cohésion (matériau grenu).

Lorsque les sols à traiter sont mous et compressibles, renfermant des matériaux organiques, le terrain ne peut offrir une résistance pérenne au refoulement (expansion latérale de la colonne ballastée). Dans ce cas, l'amélioration des sols par colonnes ballastées peut être impossible en raison du comportement évolutif des matériaux organiques et de leurs déformations par fluage. L'incorporation d'inclusions rigides est dans ce cas nécessaire (Khatine, M. (2011)).

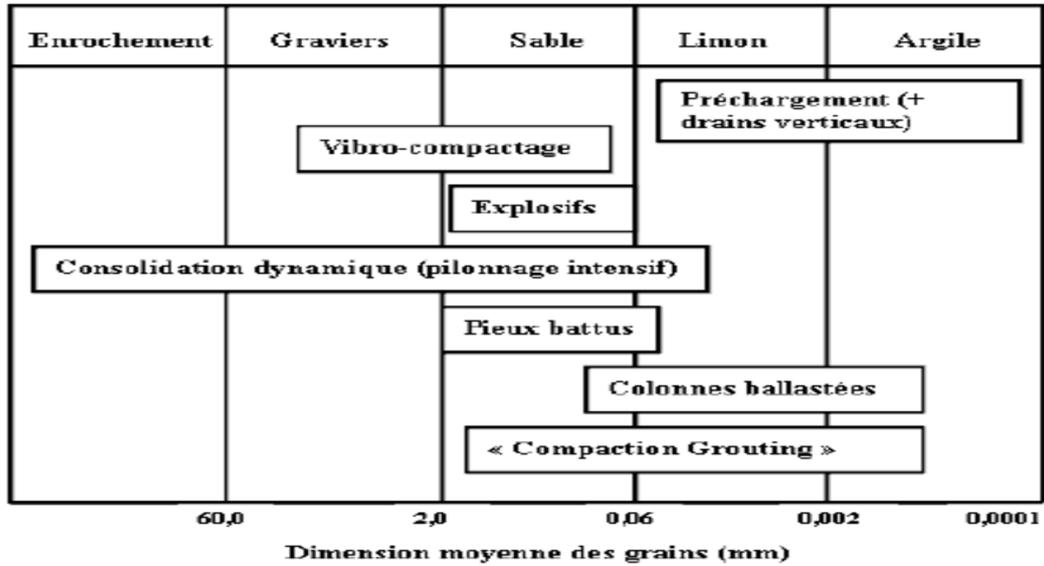


Fig I.1 : Schéma général de l'application des techniques d'amélioration des sols

I.3.1 Amélioration de sol par compactage:

Compacter un sol consiste à faire diminuer son volume par l'application d'un procédé mécanique

Cette diminution du volume ne se produit que par l'élimination des vides remplis d'air qui existe dans le à son état initial (Mokhtar, M. A., & Moussab, H. (2018)).

I.3.1.1 Compactage par explosifs:

Utilisé généralement loin des zones urbaines, Il permet un compactage rapide et non coûteux de grands volumes de sol atteignant des profondeurs importantes. L'explosion induit une onde de choc qui se tend en comprimant le sol ; ainsi produite, l'onde de choc génère dans le sol des contraintes de cisaillement alternées. En dépassant la résistance frottement entre grains, elles engendrent des déplacements relatifs entre ces grains. Ces mouvements des grains induisent une diminution du volume des vides, si le sol est saturé cette diminution génère une augmentation de la pression interstitielle qui nous conduira à la liquéfaction. Dans le cas d'un sable, la dissipation de la surpression est très rapide, le sol obtient un nouveau réarrangement plus dense (Ahmed, A, et, all (2012)).

I.3.1.2 Compactage dynamique :

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

provoquées par le choc qui induit des mouvements relatifs entre les grains du sol. Dans le cas d'un sol pulvérulent, la densification mène à la liquéfaction de la zone perturbée et un nouveau réarrangement est obtenu après dissipation de la surpression interstitielle toujours sous l'influence de la gravité. (Ahmed, A, et, all (2012)).

Objectif de technique :

- Traitement de sol de mauvaise qualité au profondeur par des actions en surface.
- Amélioration des propriétés géotechnique des sols lâches tels que la cohésion.
- Diminution des vides et augmentation de contact granulaire.

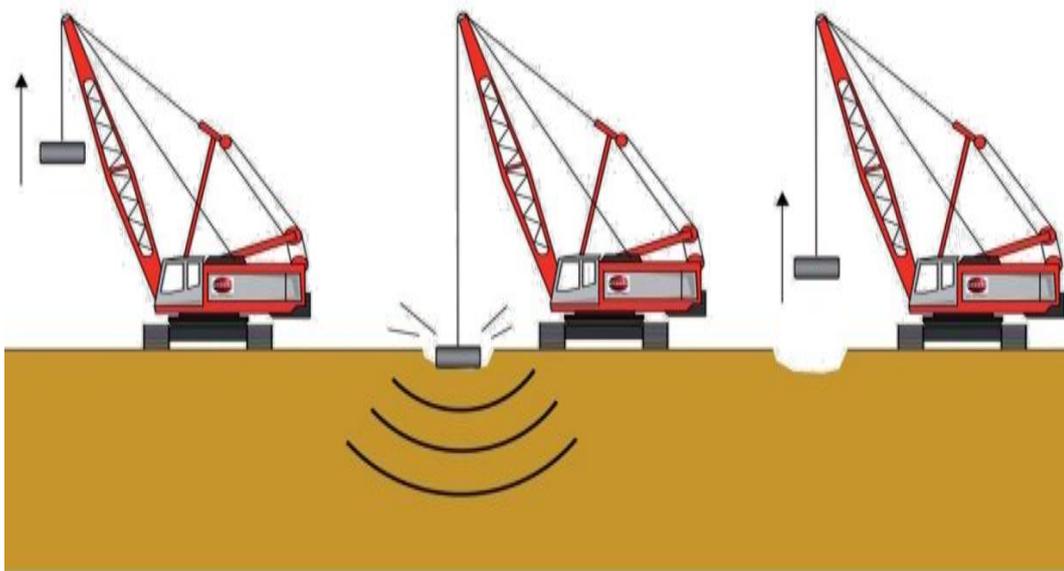


Fig I.2 : technique de compactage dynamique

I.3.1.3 Vibrocompactage :

Le vibrocompactage est une technique d'amélioration du sol qui densifie les sols grenus sans cohésion. C'est une technique développée par Keller dans les années 30 et qui a fait ses preuves depuis. (btp-cours.com)

Utilisations :

- Réduction des tassements
- Augmenter la capacité portante, permettant une réduction de la taille des semelles
- Atténuer le potentiel de liquéfaction
- Se prémunir des cisaillements horizontaux induits par le séisme

Avantage :

- Offre une solution économique pour l'amélioration des sols
- Peut être réalisé à presque n'importe quelle profondeur
- La réalisation de fondation superficielle
- Respectueux de l'environnement car il utilise des matériaux naturels et in situ
- Silencieux avec des vibrations adaptées à l'environnement

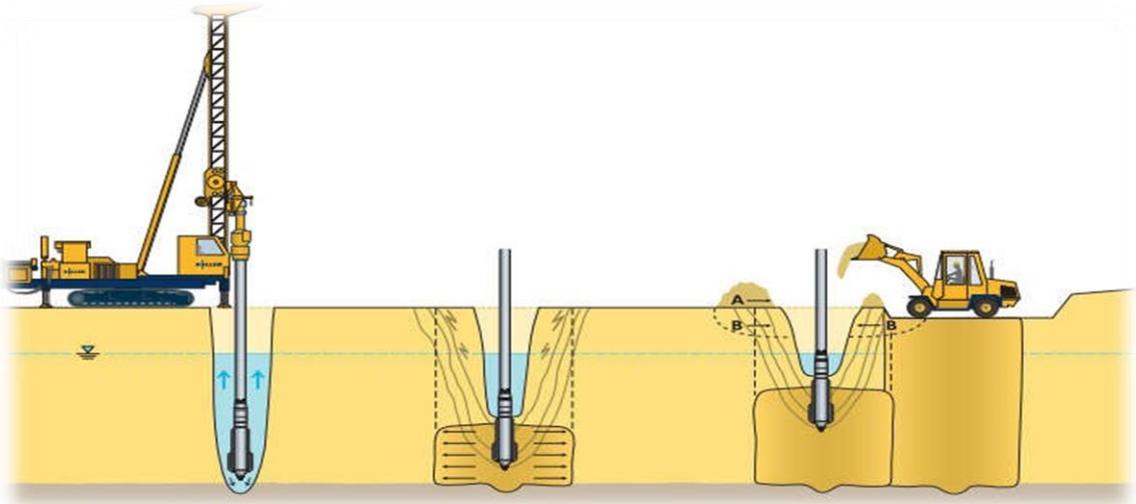


Fig I.3: Principe de vibrocompactage

I.3.1.4 Le compactage statique horizontal par injection solide :

L'injection solide ou Compactage Horizontal Statique (CHS) consiste en l'injection d'un mortier à faible slump pour densifier les sols meubles et granulaires. Une application se trouve dans les sols décomprimés des dolines et dans la stabilisation des vides souterrains. (btp-cours.com)

Utilisations :

- Souvent choisi pour une augmentation ou le rétablissement de la capacité portante du sol sous des fondations existantes
- Réduction du risque potentiel de liquéfaction
- Diminuer ou corriger le tassement
- Augmenter la capacité de portance
- Stabiliser les effondrements ou réduire le risque d'effondrement

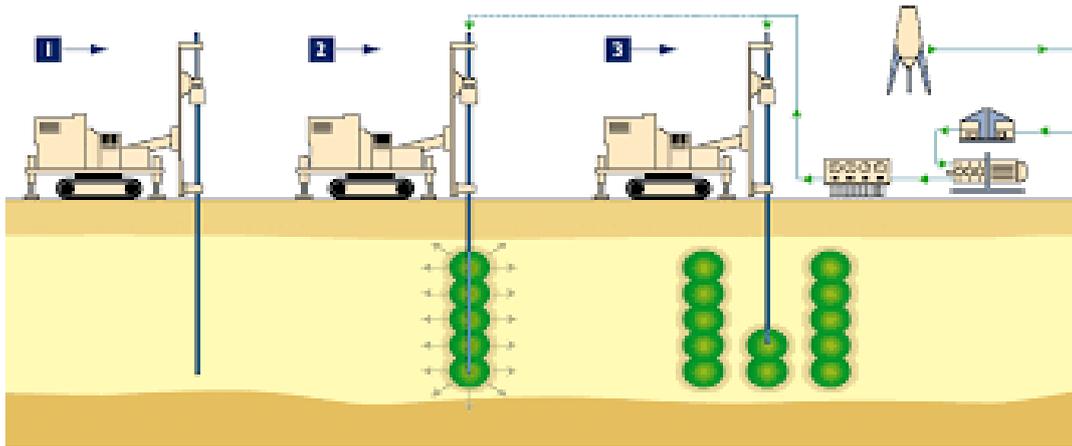


Fig I.4: Principe d'injection solide injection solide.

I.3.2 Amélioration de sol par Drainage:

I.3.2.1 Drains verticaux:

Le drainage vertical est une technique complémentaire des techniques de préchargement. Il permet une consolidation plus rapide du sol. Le drainage vertical s'applique aux terrains peu perméables et permet d'augmenter considérablement leur vitesse de consolidation. Les drains verticaux sont utilisés pour l'amélioration de sols saturés en eau (ex : terrains silteux ou argileux). La technique consiste à foncer verticalement dans le terrain, suivant un maillage déterminé, un drain préfabriqué. Au moment de sa mise en service, le drain véhicule l'eau du terrain jusqu'à la surface. La surcharge est apportée soit par un remblai de préchargement, soit par d'autres méthodes. (Bouassida.M, 2008).

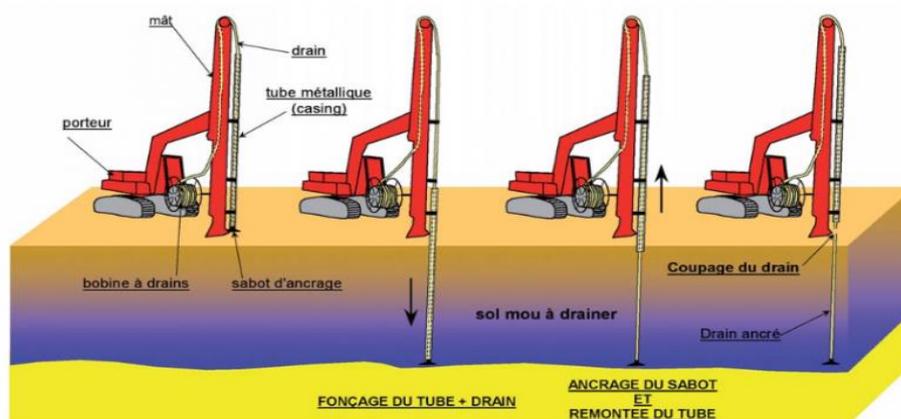


Fig I.5 : Principe de drainage vertical.

Les drains verticaux en plastique souple plats ou cylindriques, peuvent atteindre des profondeurs de 40 mètres ou plus. Selon la nature et la composition des terrains à traiter, les drains peuvent être également réalisés sous forme de colonnes de sable ou de granulats.

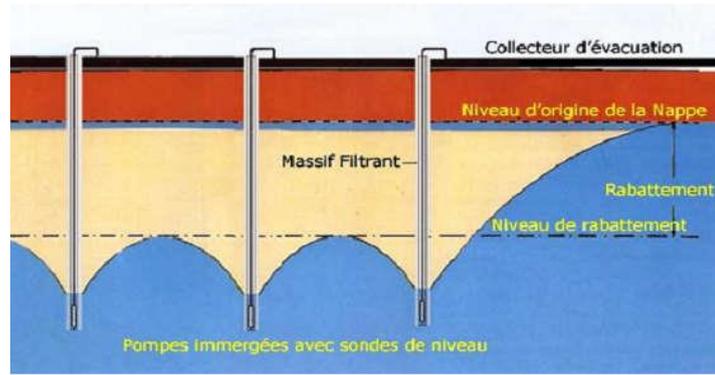


Fig I.6: Technique de rabattement de nappe.

I.3.2.2 rabattement de nappe:

Cette technique est employée en France et à l'étranger dans de nombreux cas d'assèchement de Fouilles en terrains alluvionnaires. On abaisse le niveau d'une nappe souterraine au dessous de celui où doit être fondé l'ouvrage de façon à permettre son exécution sans avoir à effectuer d'épuisement dans les fouilles elles même. (Mokhtar, M. A., & Moussab, H. (2018)).

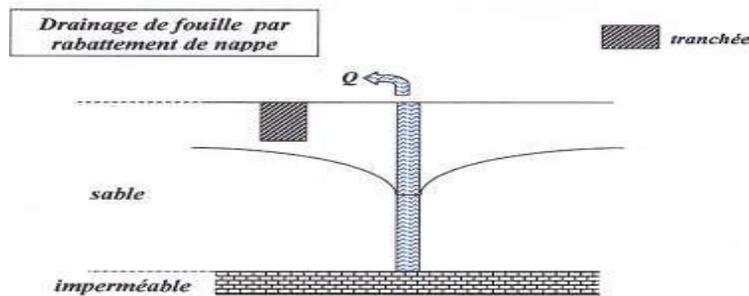


Fig I.7: Drainage de fouille par rabattement de nappe

Cette technique est particulièrement recommandée quand l'épuisement direct des fouilles est susceptible de compromettre la stabilité des talus et de leurs parois. On utilise des puits filtrants Dont les caractéristiques et l'espacement est fonction du cas considéré. Selon les méthodes de Rabattement, suivant les débits et dénivelés à obtenir, les pompes sont généralement :

- Soit des pompes classiques soit des pompes à vides qui assurent le fonctionnement d'un élément de rabattement ou de plusieurs à la fois.
- Soit des émulseurs.
- Soit de pompes immergées directement dans ces éléments.

Il est nécessaire de réunir préalablement à l'exécution des travaux, soit par des reconnaissances du Sol, soit par des essais de pompage, soit par la conjonction de ces deux procédés, les données Indispensables sur la perméabilité du sol, le niveau des nappes aquifères, sur les variations Piézométriques, sur la température et la qualité de l'eau. Sauf circonstances locales particulières la côte de rabattement doit être inférieure, d'au moins 40cm à celle du fond de la fouille. Dans

certain cas, il est nécessaire de ne pas laisser la nappe s'abaisser en dehors de la zone de fouille à cause de culture ou de puits exploités voisins. On procède alors à une réalimentation ou à la mise en place d'un écran étanche.

I.3.3 Amélioration de sol par Traitement :

Le traitement des sols par un liant hydraulique vise à rendre un sol, dont les caractéristiques ne seraient pas adéquates, apte à supporter une chaussée, une plateforme (parking, aire commerciale ou industrielle) ou tout simplement le passage d'engins de travaux. Ce traitement vise également à le rendre résistant aux aléas climatiques auxquels il peut être soumis. L'idée de base, éminemment économique, du traitement de sol est de considérer le sol lui-même comme un matériau. Cette technique, développée dans les années 50 pour la réalisation d'assises de chaussées dans des pays tropicaux, s'est acclimatée en France dans les années 60.

I.3.3.1 Traitement des sols à la chaux :

Matériau contenant de l'oxyde de calcium et de magnésium (CaO , MgO) et/ou de l'hydroxyde de calcium et de magnésium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$). Selon la composition et les autres constituants, est utilisé comme liant, en traitement de sol, pour la fabrication de badigeon, etc. Le traitement des sols à la chaux est une pratique très ancienne, comme en témoignent les bétons de terre traditionnels (argile + sable + chaux). Les sols fins à teneur élevées en argiles ou limons ne présentent aucune stabilité au regard des conditions météorologiques : ils gonflent en présence d'eau, se rétractent par sécheresse et foisonnent quand il gèle. Leur utilisation routière est donc très incertaine. Le traitement à la chaux est recommandé pour les sols dont la teneur en argile est supérieure à 40%. Le dosage en chaux varie en fonction des sols et des résultats recherchés généralement entre 1 et 3%. Le comportement de ces sols fins est modifié par l'ajout de chaux. (Chawki, M. A. H. D. I. (2019))



Fig I.8 : Traitement des sols à la chaux.

I.3.3.2 Traitement par ciment :

Le ciment est un additif qui peut être utilisé pour la stabilisation du sol dont il augmente la Résistance, limite le retrait, diminue la plasticité et réduit le potentiel des variations de volume. Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont a priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, auxquels il apporte cohésion, résistance mécanique, stabilité à l'eau et au gel. La prise au ciment est plus Rapide que celle de la chaux (qui évolue encore au bout d'un an), mais elle est stoppée par le gel. (CHAA, K. (2020))



Fig I.9 : Traitement des sols au Ciment.

I.3.4 Amélioration de sol par renforcement:

I.3.4.1 Colonnes ballastées:

Cette technique consiste en la réalisation de colonnes en gravier ou ballast avec un vibreur pour renforcer tous les sols dans la zone de traitement et densifier les sols granulaires environnants. C'est une technique développée par Johann Keller, le fondateur de notre société. Elle fait partie intégrante de nos projets depuis plus de 70 ans.

Utilisations :

- Réduction des tassements
- Réalisation de fondation superficielle
- Augmenter la capacité portante, permettant une réduction de la taille des semelles
- Augmenter la résistance au cisaillement
- Réduire les phénomènes de 'latéral spreading' induit par un séisme

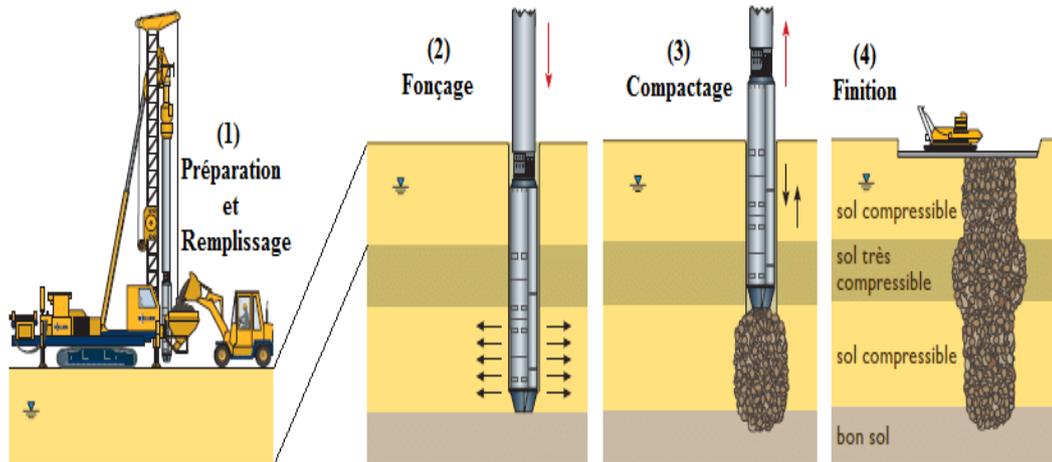


Fig I.10: Principe d'injection de colonnes ballastées

I.3.4.2 Jet-grouting :

Le traitement des sols par jet-grouting est une technique de renforcement de sol qui est née dans les années 50 au Royaume-Uni. La présence d'un substratum très profond rend l'ancrage des fondations difficile et coûteux. Il s'agit donc d'un procédé de mélange hydrodynamique permettant de former un béton de sol et d'ancrer les fondations dans la couche superficielle qui surplombe le substratum et qui a, en général, de moins bonnes caractéristiques mécaniques.

(RAHAI et BOUSSALEM M 2018)

Utilisations :

- C'est souvent la meilleure solution dans les situations nécessitant la maîtrise des écoulements d'eaux souterraines dans le cadre d'excavation.
- Reprises-en sous-œuvre de fondations.
- Soutènement pour des fouilles.

Avantage :

Efficacité des systèmes de grouting sur une grande majorité de sol, y compris les limons et la plupart des argiles

- permettant de réaliser les travaux dans des espaces restreints tels que des sous-sols
- possibilité de cibler des couches de sols spécifiques situées à une profondeur prédéfinie sans avoir à traiter les couches supérieures
- Peut généralement se faire sans perturber les opérations normales de l'installation

- L'équipement de support facilement mobile et placé dans des conteneurs pour réduire les coûts de mobilisation et de démobilisation et réduire les délais (www.keller-france.com)

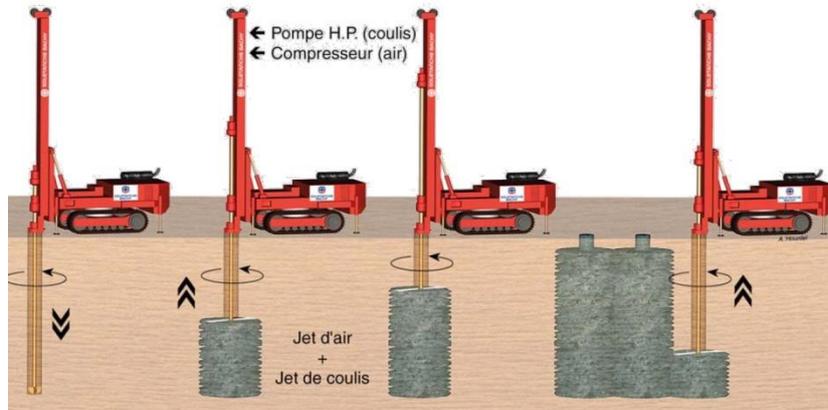


Fig I.11 : Jet grouting

I.3.4.3 Amélioration par Géotextile:

Si l'utilisation des ouates polyester, de coton ou de laine et celle des feutres et aiguilletés est courante, le recours aux propriétés du géotextile pour les infrastructures (consolidation des routes, pistes d'atterrissage, barrages, lacs et tunnels) appartient aux techniques d'avant garde. En effet le renforcement mécanique des sols par ce procédé est très ressenti. Des résultats prometteurs donnent lieu à des études approfondies de ce système. En effet il ressort que les géotextiles améliorent de manière significative le comportement mécanique des sols meubles. Du fait de leur capacité à se déformer et leur grande résistance mécanique il est possible d'associer le comportement de certains sols à celui des tissus pour obtenir un sol au comportement spécifique.

Le géotextile hydraulique et mécanique assure:

- Une dissipation plus rapide des variations de pressions.
- Une meilleure mise en œuvre des matériaux granulaires.
- Une économie sur le volume des enrochements ou du remblai hydraulique.
- Une stabilisation accrue de la fondation des ouvrages.

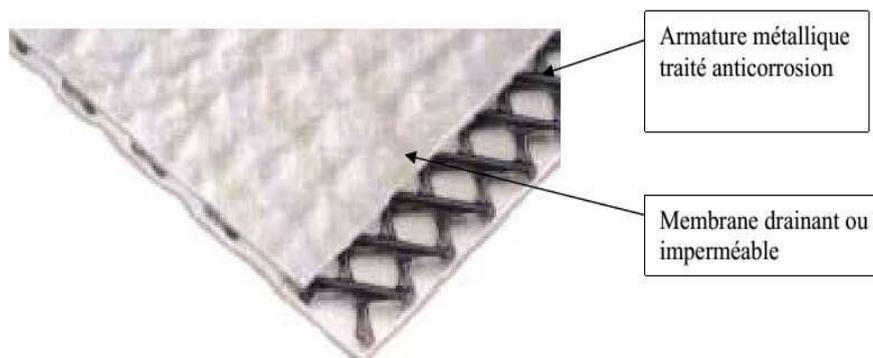


Fig I.12 : Géotextile (Giroud. J. P, 1981).

I.3.4.4 Renforcement par armature métalliques (Terre Armée) :

Dans les années 60, Henri Vidal dépose le brevet de la «Terre-Armée». C'est un principe de renforcement des sols par l'association d'armatures métalliques et de remblai grenu, type sable, qui permet la formation d'un massif mécaniquement plus performant. Le parement de ce type de massif est constitué d'un parement béton modulaire dont l'élément de base est appelé écaïlle. Les écaïlles sont reliées aux armatures constituées, elles, en lanières métalliques. (CHAA, K. (2020))

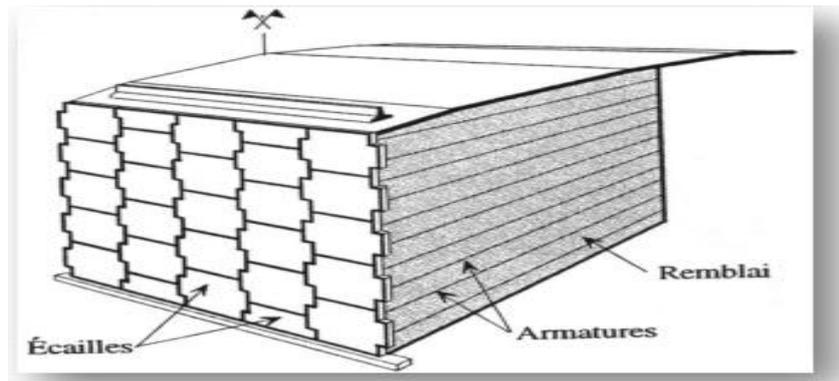


Fig I.13 : Terre armée

I.3.4.5 Renforcement par des fibres :

La technique du sol renforcé avec fibres consiste en l'addition des fibres végétales ou synthétique au sol. Cette technique présente plusieurs avantages: les fibres peuvent simplement ajoutées et mélangées avec le sol de même manière que le ciment, la chaux et d'autres additifs, les fibres distribuées aléatoirement peuvent limiter les plans de faiblesse potentiels qui peuvent se développer parallèlement aux armatures conventionnelles orientées, la distribution aléatoire des fibres fournit une augmentation isotrope de la résistance du composite du sol. Les fibres utilisées peuvent être distinguées par son matériau constitutif, en effet, de nombreux types de fibres sont utilisés par les chercheurs pour renforcer à la fois les sols granulaires et cohésifs tels que les fibres de polypropylène, de caoutchouc, de verre et naturelles. Le matériau sol renforcé de fibres peut être utilisé pour le renforcement des remblais derrière les ouvrages de soutènement comme en techniques routières. (Chawki, M. A. H. D. I. (2019))

I.4 Histoire de renforcement des sols par fibre :

Le concept de renforcement du sol avec des fibres, en particulier ceux d'origine naturelle, Origine dans les temps anciens dans certaines applications. Les civilisations en Mésopotamie ont ajouté des paillettes à des briques de boue pour assurer l'intégrité d'une matrice faible en arrêtant la croissance des fissures (Majundar, 1975; Hoover et al., 1982). Par exemple, l'utilisation de

fibres naturelles dans la construction composite peut être vue encore aujourd'hui dans les zones rurales de certains pays, tels que l'Inde. En réalité, l'intérêt scientifique dans le renfort fibreux des sols a commencé dans les années 1970 avec une tentative d'estimer l'influence des racines des plantes et des arbres sur la stabilité des pentes de terre (Waldron, 1977). On notera que les fibres synthétiques et naturelles, y compris les racines des plantes, se comportent comme des renforts extensibles car ils ont un module d'élasticité relativement faible.

La stabilisation des sols a été réalisée depuis des millénaires. Par exemple, les Mésopotamiens et les Romains ont découvert séparément qu'il était possible d'améliorer la capacité des voies de transport de trafic routier en mélangeant les sols faibles avec un agent stabilisant comme le calcaire pulvérisé ou le calcium (Hejazi et al., 2012). La présence des racines de plantes est un moyen naturel dont l'incorporation des inclusions de fibres est orientée de façon aléatoire dans les sols. Ces fibres végétales améliorent la résistance des sols et la stabilité des pentes naturelles (Brown et al. 1975; Waldron et al, 1977; Wu et al., 1988; Kaniraj et al., 2003). Par conséquent, le concept de renforcement des fibres a été reconnu il y a plus de 5000 ans. Par exemple, les civilisations anciennes ont utilisé la paille et le foin pour renforcer les blocs de boue afin de créer des éléments de construction renforcés (Abtahi et al. 2009). Il existe plusieurs exemples de renforcement du sol comme la Grande Muraille de Chine (qui a été réalisée en utilisant des branches d'arbres comme éléments de traction) ainsi que Ziggurats de Babylone (Rao et al., 1996). Dans l'histoire moderne de la stabilisation des sols, le concept et le principe du renforcement du sol a été développé pour la première fois par Vidal (1969). Il a démontré que l'introduction d'éléments de renforcement dans une masse de sol augmente la résistance au cisaillement du milieu (Akbulut et al., 2007). Depuis l'invention de Vidal en 1966, Près de 4000 structures ont été construites dans plus de 37 pays à ce jour en utilisant le concept de renforcement de la terre renforcée (Juyol et al., 1994 ; Azeem et al., 1992). Tout d'abord, les filaments de polyester avant les fibres discontinues ont été introduites sur le marché de l'ingénierie géotechnique sous la marque traditionnelle de «Texsol». Ce produit a été utilisé dans les murs de soutènement et pour les protections des pentes. Cependant, les sols renforcés par des fibres courtes distribués aléatoirement, ont récemment attiré de plus en plus d'attentions dans de nombreuses applications d'ingénierie géotechnique, non seulement dans l'environnement de recherche scientifique mais aussi dans le domaine de réalisation (Leflaive, 1985). Les fibres synthétiques discontinues ont été utilisées dans le sol depuis la fin des années 1980, lorsque les premières études utilisant des fibres polymères ont été menées (Li, 2005). Finalement, on peut conclure que le concept de renforcement des sols avec des fibres naturelles a été créé dans les temps anciens. Toutefois, cette technique reste plus ou moins embryonnaire quant à leur

utilisation dans les projets géotechniques. (Layla, BOUARICHA 2018)

I.5 Les Fibres Naturelles :

Parmi les fibres naturelles, on distingue les fibres :

a. Les fibres végétales qui comprennent

- ✓ des fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok),
- ✓ les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ortie),
- ✓ les fibres extraites de feuilles (sisal), de troncs (palmier), d'enveloppes de fruit (noix de coco)

b. Les fibres animales qui proviennent des poils, telles que la toison animale, et des sécrétions telles que la soie ;

c. Les fibres minérales : on peut évoquer l'amiante (Leyla, BOUARICHA 2018)

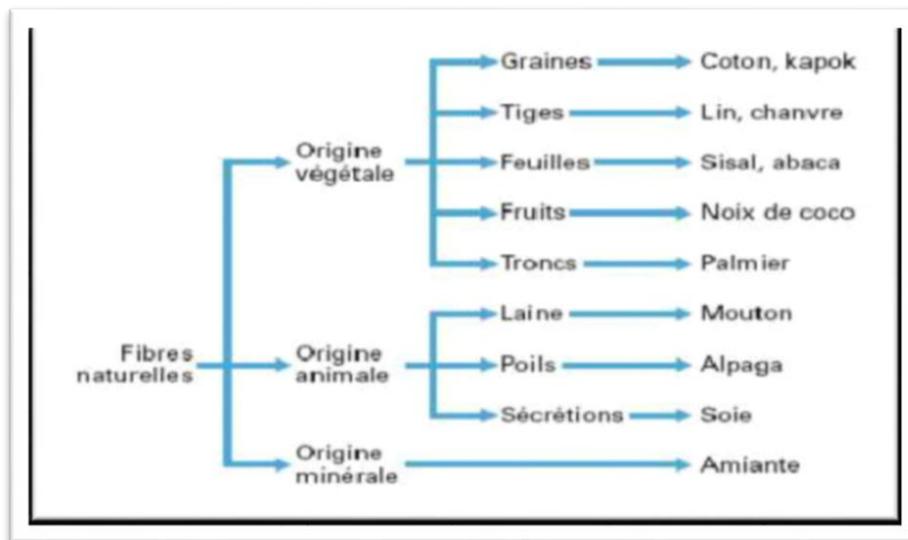


Fig I.14 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013)

I.6 Fibres synthétiques :

Les fibres synthétiques sont plus utilisées dans le béton et le sol pour améliorer leurs propriétés (Wang, 2006). Elles ont fait leurs apparitions au début de 20ème siècle, après la réussite de fibre naturelle, depuis lors, un grand nombre de fibres synthétiques ont été mises au point; elles possèdent chacune des propriétés qui répondent à un type particulier d'application. Ces fibres, tout comme les fibres artificielles, sont obtenues par filage. Elles suscitent l'intérêt de beaucoup d'industriels pour leur faible coût, leur disponibilité et leur indépendance des saisons et surtout la possibilité de les adapter et modifier leurs propriétés, par contre, elles posent un impact négatif

quant à leur comportement vis-à-vis de l'environnement que ce soit pendant le processus de fabrication ou après leur utilisation et les difficultés de leur recyclage. Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées sont:

- **Les polyamides** (Nylons);
- **Les polyesters**;
- **Les dérivés polyvinyliques**;
- **Les polyoléfines**: les polyéthylènes et les polypropylènes : sont d'une importance croissante et leur production s'élève maintenant à environ 8% de toutes les fibres synthétiques.
- **Fibres artificielles**: Ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus utilisées dans l'industrie de la construction.

I.6.1 LES FIBRES DE POLYPROPYLENE :

Le polypropylène est un thermoplastique obtenu par polymérisation du propylène. Il donne aussi des copolymères avec l'éthylène. C'est la deuxième matière plastique utilisée après les polyéthylènes. Il possède une grande résistance mécanique, une bonne inertie chimique, une bonne résistance à la traction qui peut atteindre jusqu'à 800 Mpa, une déformabilité élevée et est facilement recyclable. Il donne des fibres employées par exemple pour fabriquer des tapis, des films pour les emballages.

les fibres de polypropylène sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs, ainsi que l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions et aussi dans la réalisation des canalisations et comme des fibres de renfort pour le béton, sols, corps de chaussée et les remblais ... etc. (CHAA Khalissa 2020)



Fig I.15 : Fibres de polypropylène

I.6.1.1 LES CARACTERISTIQUES MECANQUES ET PHYSIQUES DES FIBRES DE POLYPROPYLENE :

Tableau I.1 : Les caractéristiques mécaniques et physiques des fibres polypropylène

Fibres	polypropylène
Diamètre (μm)	10-200
Longueur (mm)	25-75
Densité	0.9
Rt Mpa	400-750
E 10^3 Mpa	5-10
Allongement à la rupture en %	15-25
Coefficient de dilatation (μm)	90
R Temps Max C°	150

I.8 Conclusions :

Les techniques de renforcement et stabilisation des sols permettent d'augmenter la résistance ainsi que réduire la déformabilité sous l'effet du chargement appliqué. Plusieurs techniques sont utilisées pour améliorer la performance des sols de fondations et remblais. Ces techniques sont basées parfois sur une approche chimique, addition des liants hydrauliques (ciment, liant, laitier, etc.) ou mécanique, incorporation d'éléments résistants (terre armée). Par ailleurs, l'association des fibres (synthétiques ou naturelles) aux sols est une technique relativement récente qui peut un composite alternatif techniquement acceptable et efficace, simple à réaliser et respectant de l'environnement.

L'étude d'amélioration et renforcement de terrain présente une grande importance pratique ; Il est donc impératif d'adapter le bâti aux impératifs du sol. Une étude géotechnique sérieuse et approfondie du sol est donc nécessaire avant l'implantation de la construction à fortiori dans les terrains à forte déclivité. Le zoning en fonction de la nature du sol et des caractéristiques mécaniques du sol, permettra sans doute de mieux gérer l'espace urbain et d'éviter les catastrophes qu'on vient d'énumérer.

Chapitre II:
Influence des fibres
sur le
comportement
mécaniques des
sables améliorés

II. 1 Introduction :

L'amélioration des sols par l'utilisation des fibres c'est une technique qui a été utilisée avec succès pour une variété d'applications telles que la stabilisation des pentes, plate- forme de la route etc. C'est une technique relativement simple pour l'amélioration du sol et dispose d'un énorme potentiel en tant qu'une solution efficace a de nombreux problèmes géotechniques. Le comportement des sols renforcés par des fibres a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années. Plus précisément, de nombreux chercheurs ont axé leurs recherches sur le comportement mécanique des sols sableux renforcés de fibres. (P. D buhan et Jean.S)

La route reste la seule infrastructure qui permet de desservir l'ensemble des utilisateurs. La réalisation des projets routiers fait appel à un ensemble d'activités de plus en plus nombreuses et complexes qui demandent des efforts importants et soutenus en matière de gestion de projet. En effet tout projet, dans quelque domaine qu'il intervienne, nécessite des études successives dont les portées et les objectifs seront différents et adaptés aux problématiques propres à chaque niveau de définition. (Khababa Anes Abderrahmene 2021)

II.2 Constitution d'une structure déchaussée :

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini. Tout d'abord le sol terrassé ou sol- support est surmonté généralement d'une couche de forme. L'ensemble sol- couche de forme représente la plate- forme support de la chaussée. La couche de forme a une double fonction. Pendant les travaux, elle assure la protection du sol- support, permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins. En service, elle permet d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou le remblai, et d'améliorer la portance à long terme. Puis viennent la couche de base et la couche de fondation formant ainsi les couches d'assise. Les couches d'assise apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic être partissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible. (Khababa Anes Abderrahmene 2021)

Enfin, la couche de surface se compose de la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison entre la couche de roulement et les couches d'assise. Elle a deux fonctions. D'une part, elle assure la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau. D'autre part elle confère aux usagers un confort de conduite d'autant plus satisfaisant que les caractéristiques de surface sont bonnes.

Selon les matériaux granulaires liés (enrobés, béton...) ou non liés composants les couches des chaussées, nous distinguons plusieurs types de structures. Dans la suite, nous allons présenter les classifications des chaussées françaises.

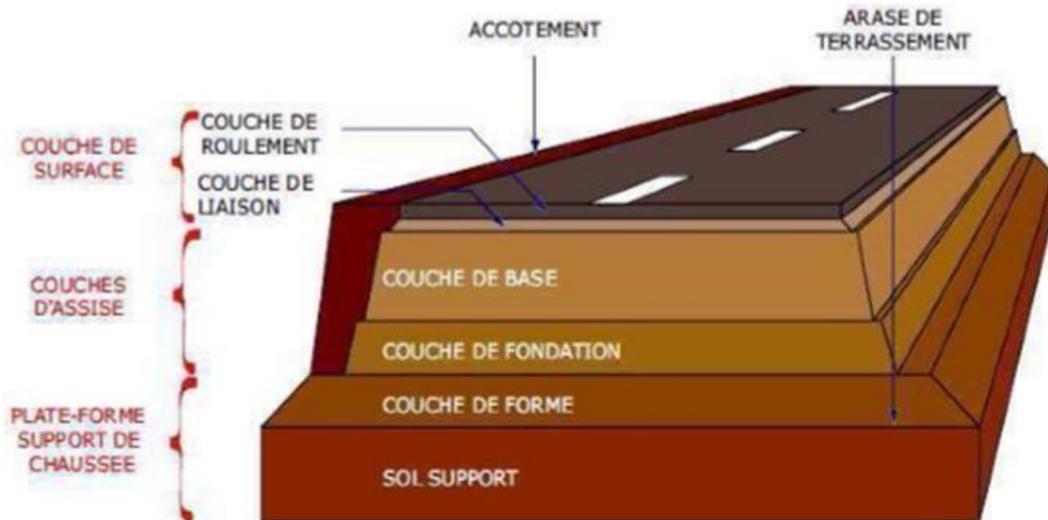


Figure II.1 Constitution d'une structure de chaussées.

II.2.1 Chaussée souple :

Elle comporte une couverture bitumineuse mince (moins de 15cm), parfois réduite à un simple enduite superficiel, reposant sur où plusieurs couches de matériaux granulaires non traitée (30 à 60cm).

L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 à 60 cm.



Béton bitumineux

Matériaux granulaires non traités

Plate forme

Figure II.2: Chaussées souples.

II.2. 2 Chaussée bitumineuse épaisse :

Elle comporte une couche de roulement bitumineuse (4 à 8cm) d'épaisseur, sur un corps de chaussée en matériau traité aux liants hydrocarbonés (15 à 40cm), fait d'une ou deux couches (Base et fondation). L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 20 et 50cm.



Béton bitumineux

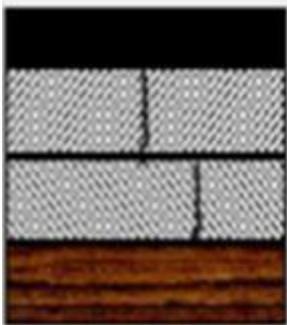
Grave bitumes

Plate forme

Figure II.3 : Chaussées bitumineuse épaisse

II.2. 3 Chaussée semi-rigide :

Elle comporte une couche de roulement bitumineuse (6 à 12cm), sur une assise en matériau traité aux liants hydrauliques disposée en une ou deux couches (15 à 50cm) d'épaisseur. Dont l'épaisseur totale est l'ordre de 20 à 60cm.



Béton bitumineux

Matériaux traite aux liant hydraulique

Matériaux traite aux liant hydraulique

Plate forme

Figure II.4: Chaussées semi-rigid.

II.2. 4 Chaussée mixte :

Elle comporte une couche de roulement et de base (10 à 20cm) en matériaux bitumineux, sur une fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 30cm). Le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale doit être de l'ordre de $\frac{1}{2}$.



Béton bitumineux

Matériaux traite aux liant hydraulique

Grave bitumes

Plate forme

Figure II.5: Chaussées à structure mixte.

II .2. 5 Chaussée a structure inverse :

La structure inverse se distingue de la chaussée mixte, par la présence, d'une couche de matériaux granulaire d'environ 12cm entre la couverture bitumineuse, et la fondation en matériaux traités aux liants hydraulique.

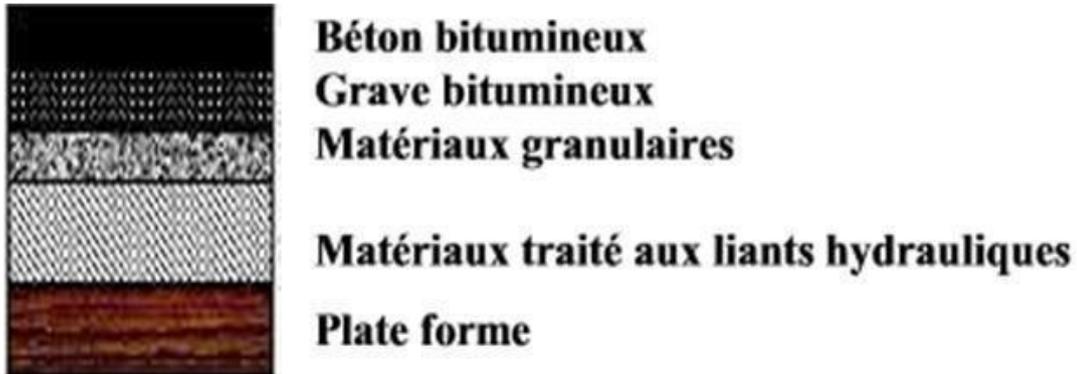


Figure II.6: Chaussées à structure inverse.

II.2. 6 Chaussée rigide :

Elle comporte une couche de béton de ciment de 15cm à 40cm d'épaisseur, éventuellement recouverte par un béton bitumineux très mince elles reposent : Soit sur une fondation en béton maigre ou en grave ciment soit sur une couche de réglage fin en béton bitumineux ou grave bitume Soit sur une couche drainante (dalle épaisse).

II.3 Les dégradations des chaussées :

Les dégradations des chaussées, selon le catalogue des dégradations de surface des chaussées, peuvent être divisées en quatre familles : les arrachements et les mouvements de matériaux, les dégradations de déformation, les fissures. (Khababa Anes Abderrahmene 2021)

Les deux premières familles reflètent la qualité de la couche de surface. Les deux dernières familles concernent la détérioration mécanique de la structure.

II.3.1 Les dégradations d'arrachement :

Ces dégradations concernent plutôt la qualité de la couche de surface et en ce sens des problèmes de sécurité routière en rapport avec l'adhérence et l'uni des chaussées. Ces phénomènes sont dus soit à l'usure de la couche de surface, l'arrachement des gravillons du revêtement, le départ localisé de matériau de la couche de surface, le départ de gravillons de la couche de surface ou bien le départ du liant autour des granulats dans la couche de surface.

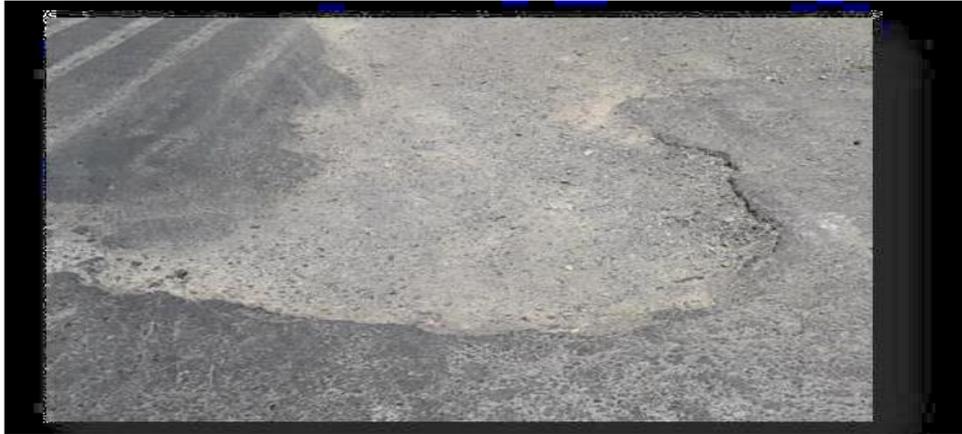


Figure II.7 : Dégradation d'arrachement.

II.3.2 Les mouvements de matériau :

Ces dégradations sont causées par des remontées du liant à la surface de la chaussée, par l'enfoncement de gravillons dans l'enrobé en période chaude, les remontées des éléments fins à la surface de chaussée ou par l'éjection de l'eau à la surface lors du passage des véhicules lourds par suite de l'existence de cavités sous la couche de surface. (Hedadcha Abdennour. G 2021)

II.3.3 Les dégradations de déformation :

Les dégradations de déformation sont en général celles qui donnent des déformations visibles en surface, comme les phénomènes irréversibles suivants : l'ornièrisme, l'affaissement, le gonflement, le bourrelet, le décalage de joint de dalle ou de bord de fissure, le flambement, les déformations de forme de tôle ondulée

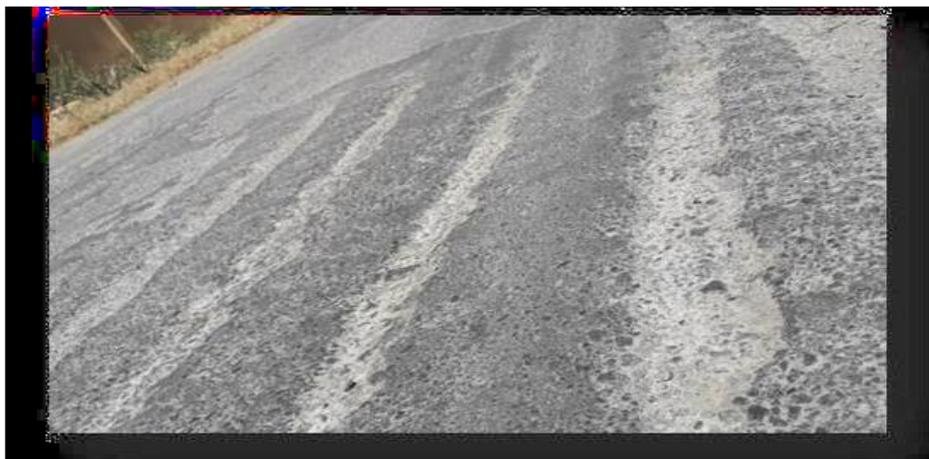


Figure II.8: L'ornièrisme.

Ces dégradations ont plusieurs raisons, parmi lesquelles nous pouvons citer le sous-dimensionnement ou une mauvaise qualité de l'assise entraînant des contraintes verticales excessives à la surface du sol support ou des couches non traitées ; une réduction de portance du sol support par défaut de drainage ou conséquence du dégel ; un drainage ou assainissement

localement défectueux ; un retrait hydrique du sol support ; des réactions physico-chimiques ponctuelles entre des constituants de la structure et l'eau formant des composés gonflants.

Pour évaluer la situation de ces problèmes, les comportements élastiques linéaires des modèles de mécanique des chaussées ne sont pas adaptés. Aussi des recherches sont en cours depuis plusieurs années pour prendre en compte les déformations permanentes et la variable de temps.

II .3.4 Les fissures :

Avec le problème de l'orniérage, les fissures sont considérées comme un des plus grands modes de dégradation de chaussées. En effet leur présence associée ou non à l'eau met en péril la durabilité à terme de la structure sous le passage répété de véhicules lourds. Le problème de fissuration peut être regardé du côté de l'endommagement des matériaux et de leur rupture comme le mettent en évidence par exemple les essais sur le comportement à la fatigue et à la rupture des matériaux bitumineux, Sur la structure de chaussée, pour un calcul de durée de vie, il est primordial de prévoir les évolutions de ces fissures. Par exemple il est nécessaire de savoir évaluer les remontées des fissures comme dans, de comprendre la fissuration par le haut ou de calculer la durabilité d'un collage entre couche.

II.4 Atténuation à la liquéfaction :

Le terme liquéfaction tel que rapporté par plusieurs auteurs (Castro, 1969; Poulos, 1981) est un phénomène observable généralement sur les sables lâche saturés et qui est caractérisée par une augmentation rapide de la pression interstitielle, suivie soudainement par une perte de résistance au cisaillement. Cette résistance se stabilise progressivement à l'approche de l'état stable qui correspond à l'apparition aux grandes déformations où la résistance atteint sa valeur résiduelle. Il existe de nombreuses techniques d'atténuation à la liquéfaction utilisées par les ingénieurs en pratique pour réduire le risque à la liquéfaction. Dans les vingt dernières années, la recherche avancée a facilité la meilleure compréhension des phénomènes de liquéfaction des sols basée sur le travail en laboratoire, les approches théoriques, analytiques et numériques. Sur le plan d'atténuation et d'amélioration de cette problématique, plusieurs travaux de recherche sur le phénomène de liquéfaction sur des sols sableux saturés et partiellement saturés ont été conduits dans différents laboratoires afin d'en maîtriser différents facteurs pouvant être la cause de ce phénomène. Les méthodes les plus courantes pour améliorer les propriétés mécaniques des sols peuvent être classées comme densification, renforcement et drainage (Yegian et al., 2007). L'utilisation de fibres peut être l'une des méthodes de renforcement les plus pratiques en raison de la faisabilité technique et de la rentabilité (Maher et Woods, 1990). Quelques résultats

présentés dans la littérature sur le comportement à la liquéfaction statique réalisés sur des sables renforcé par des fibres utilisant des essais triaxiaux en condition drainées et non drainées ont confirmé l'efficacité du renforcement par fibre sur l'amélioration de la résistance du sol à la liquéfaction (Loehr et al.,2005; Chen, 2007; Ibraim et Fourmont, 2006; Chen et Loehr, 2008; Chen, 2010; Freilich et al., 2010; Diambra et al., 2011; Dehghan et Hamidi, 2016). Le mélange de fibres dans des sols liquéfiables peut diminuer le potentiel de liquéfaction en augmentant le module de cisaillement du dépôt de sol et en réduisant le développement de la pression interstitielle (Noorany et Uzdavines, 1989; Boominathan et Hari, 2002; Diambra et al., 2010; Ibraim et al., 2010).

II.4 Stabilisation et renforcement des sols:

II.4.1 fibre et renforcement :

Le renforcement du sol avec des fibres est probablement l'une des techniques les plus efficaces pour augmenter la résistance du sol. Il y a eu beaucoup de recherches sur le renforcement du sol avec des fibres dans le passé. Ici, certaines des études les plus remarquables sont discutées.

Selon Zhange et al. (2014), les matériaux de renforcement conventionnels en ingénierie géotechnique présentent certaines lacunes. Par exemple, les renforts en barres d'acier présentent un risque de corrosion dans les sols agressifs. Les géosynthétiques, normalement constitués de matériaux polymères, se détériorent également avec le temps (Sawicki et Kazimierowicz-Frankowska, 1998). Les matériaux polymères renforcés de fibres (FRP), avec plusieurs avantages par rapport aux matériaux conventionnels, sont capables de résoudre ces problèmes. Le polymère renforcé de fibres de verre (GFRP) et le polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) sont deux matériaux FRP couramment utilisés pour la construction. Par rapport à l'acier, les matériaux FRP présentent un certain nombre d'avantages, tels qu'une meilleure résistance à la corrosion, un poids plus léger, des manœuvres plus faciles sur le site et la capacité de maintenir des résistances matérielles similaires ou voire meilleures (Zhang et al. 2014).

Frost et Han (1999) ont découvert dans leurs expériences que le comportement de l'interface FRP-sable est influencé par un certain nombre de facteurs, tels que la rugosité de la surface de l'interface, la taille moyenne des grains des matériaux granulaires et la contrainte normale. Gray et Ohashi (1983) ont utilisé un modèle simple en plus d'effectuer des essais de cisaillement direct pour évaluer le comportement du sable en ajoutant des fibres. Le modèle théorique était conforme à l'équilibre limiteur de force dérivé de la figure 2.3. Un sable sec, collecté sur une plage de Muskegon, Michigan, a été utilisé avec des densités relatives de 20% et 100% et les

Chapitre II: Influence des fibres sur le comportement mécaniques des sables améliorés

propriétés suivantes : $D_{50}=0.23\text{mm}$, $C_u =1.5$, $e_{\text{max}}=0.73$ et $e_{\text{min}}=0.5$. Quatre types de fibres, notamment des fibres de roseau, de plastique (PVC), de Palmyre et de cuivre (fil) d'une longueur comprise entre 2 et 25 cm et d'un diamètre de 1 à 2 mm, ont été utilisées pour les tests. Les fibres ont été intentionnellement orientées et ont été utilisées avec des rapports de surface (surface de section de fibre sur surface de plan de cisaillement) de 0,25 à 1,67 %. Des contraintes de confinement verticales allant jusqu'à 144 kN/m^2 ont été appliquées pour l'essai à déformation contrôlée. Les résultats des tests et les prédictions basées sur le modèle correspondaient correctement. Gray et Ohashi (1983) ont déduit que les fibres amélioraient la résistance maximale au cisaillement et réduisaient la diminution de la résistance après la rupture, et il en était presque de même pour le sable meuble et dense ; cependant, avec des déformations de cisaillement plus importantes pour les sables meubles. De plus, plus les rapports de longueur et de surface des fibres ont conduit à une plus grande amélioration de la résistance au cisaillement. Il a été observé que l'amélioration maximale appartenait à l'inclusion de fibres avec l'angle initial de 60° par rapport au plan de cisaillement. Un arrachement des fibres a également été observé sous une contrainte de confinement verticale spécifique.

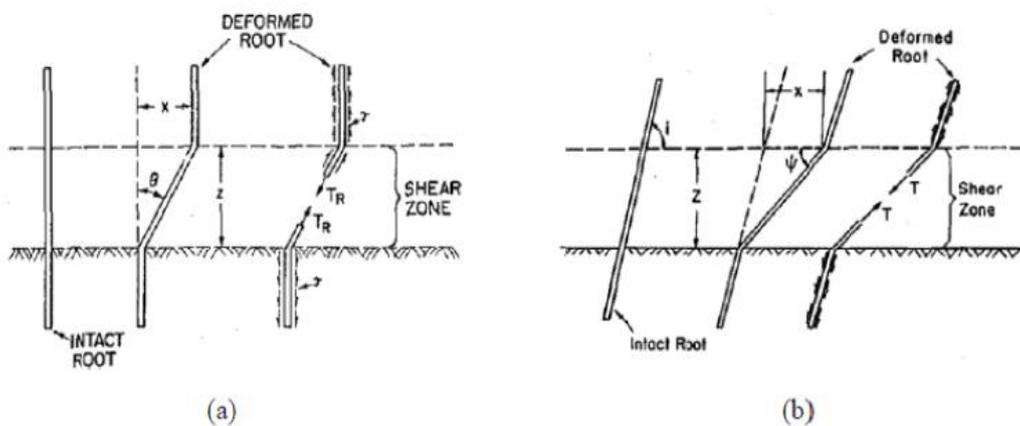


Figure II.9 : Renfort fibreux : (a) orientation perpendiculaire à la surface de cisaillement ; (b) fibre orientée selon un angle (i) par rapport à la surface de cisaillement (Gray et Ohashi, 1983 ; Shukla, 2017)

Selon Nataraj et McManis (1997), des essais de rapport portant en Californie ont été effectués sur des échantillons d'argile renforcée et non renforcée à des densités sèches et des teneurs en humidité maximales. Les résultats d'essais préliminaires pour des éprouvettes avec différentes teneurs en fibres sont présentés à la Fig. 2.4. La valeur CBR de 8,44 pour le spécimen d'argile non renforcée passe à environ 12,6 pour les spécimens avec une teneur en fibres de 0,3 %. Il s'agit d'une augmentation de 48 % de la valeur CBR pour l'échantillon d'argile non renforcée.

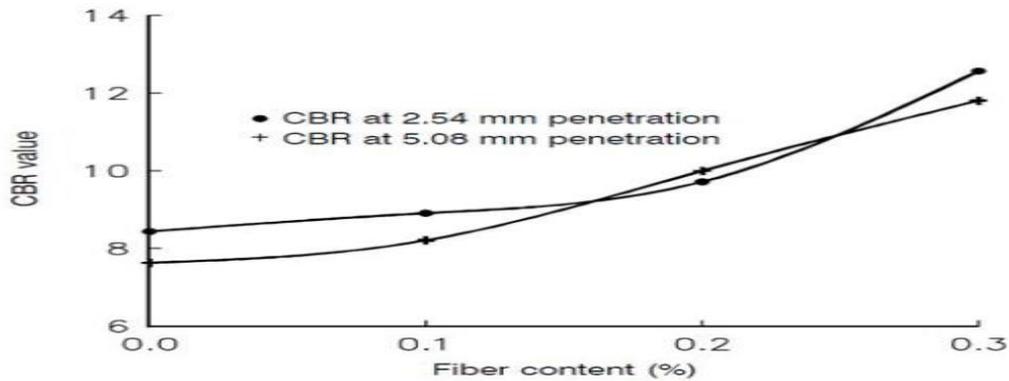


Figure II.10 : Valeurs du California Bearing Ratio pour les spécimens d'argile renforcée avec différentes teneurs en fibres (Nataraj et McManis, 1997)

Lawton et Fox (1992) ont démontré que le sable renforcé avec des géosynthétiques multi orientés donne la résistance ultime la plus élevée en termes de CBR. Tingle et al. (2002) ont observé que la stabilisation des géo fibre du sable moyen améliore le CBR d'environ six fois. Cette amélioration a été attribuée au confinement des particules de sable par des fibres discrètes. Paradani et al. (2017) ont examiné le CBR du sol de fondation renforcé avec des fibres de noix de coco, de jute et de nylon à divers pourcentages et ont signalé une augmentation globale du CBR de 60 %.

II.5.2 Renforcement par fibres et stabilisation du ciment :

Le comportement des sables non renforcés, renforcés de fibres et cimentés a été largement étudié et rapporté dans de nombreux travaux de recherche (Shukla, 2017). Les études les plus importantes sur les combinaisons de renforcement du sol avec des fibres et de stabilisation avec du ciment sont présentées ici.

Park (2011) a étudié la résistance à la compression non confinée (UCS) et la ductilité d'un sable cimenté renforcé avec des fibres d'alcool polyvinylique (PVA). Les fibres avaient une longueur de 12 mm et une épaisseur de 0,1 mm. Le ciment était du ciment Portland standard et le sol était un sable mal calibré (SP) selon l'USCS, prélevé dans la rivière Nakdong en Corée du Sud, avec les spécifications suivantes : $D_{50}=0.28$ et $C_u=1.75$ et $G_s=2.65$. Le ciment a été utilisé en trois teneurs différentes de 2, 4 et 6 % (en poids de sol) et les fibres en teneurs de 0, 0,3, 0,6 et 1 % (en poids de sol).Après avoir mélangé le sol, le ciment et l'eau, le mélange a été divisé en cinq portions, chacune étant mélangée manuellement et au hasard avec la teneur en fibres spécifiée. Les matériaux ont ensuite été compactés en cinq couches égales, et les échantillons de 70 mm de diamètre sur 140 mm de hauteur ont été durcis pendant 7 jours. D'après les résultats, il a été remarqué que l'UCS à la résistance maximale était significativement influencée par l'ajout de fibres. Dans les échantillons avec un rapport de ciment de 2 %, la plus grande amélioration de

l'UCS a été observée, dans la mesure où avec 1 % d'inclusion de fibres, l'UCS a été multipliée par 3,5. (s.v.krishnarao .Ahmed .a.nasr,)

Kutanaei et Choobbasti (2014) ont mené des essais de compactage et de compression libre sur des mélanges de sable, de fibres et de ciment pour étudier les changements de comportement mécanique. Ils ont utilisé un sable SP (selon l'USCS), collecté dans la zone côtière de la mer Caspienne à Babolsar, au nord de l'Iran, avec les propriétés suivantes : $G_s=2.78$, $C_u=2.13$, $C_c=1.32$, $D_{50}=0.22\text{mm}$, $e_{\max}=0.8$ et $e_{\min}=0.53$. Des fibres d'alcool polyvinylique ont été utilisées ayant des longueurs de 12 mm et des diamètres de 0,1 mm. Pour les essais de compactage standard, les teneurs en ciment étaient de 0, 2, 4 et 6 % (en poids) et les teneurs en fibres étaient de 0, 0,3, 0,6 et 1 % (en poids). Pour les essais de compression libre, les éprouvettes avaient un diamètre de 38 mm, une hauteur de 83 mm, des teneurs en ciment de 0,5 et 6 % et des teneurs en fibres de 0, 0,3, 0,6 et 1 %, et la charge a été appliquée avec un taux de 1 mm/min. Les résultats des tests ont indiqué que l'ajout de ciment augmente la densité sèche maximale et diminue la teneur en eau optimale, tandis que l'ajout de fibres entraîne une réduction des deux paramètres. De plus, l'UCS et le module d'élasticité, et par conséquent le comportement fragile, ont été considérablement augmentés par l'ajout de ciment. A l'inverse, l'ajout de fibres au sable traité au ciment a provoqué une augmentation de l'UCS mais une diminution du module d'élasticité, et par conséquent, a provoqué un comportement plus ductile.

Selon Kalantari et al. (2012), des échantillons de tourbe stabilisés avec du ciment avec/sans fibres ont été testés pour la résistance à la compression non confinée (UCS) et le rapport de portance californien (CBR). Afin d'évaluer la résistance de la tourbe stabilisée avec du ciment uniquement, les tests UCS et CBR ont été effectués sur des échantillons de tourbe non remaniés et également sur de la tourbe stabilisée avec différentes quantités de ciment. La quantité de ciment utilisée pour le test UCS était de 5 et 15 %, et pour le test CBR de 5, 10, 15, 20, 30 et 50 % en poids de tourbe pesée à son taux d'humidité optimal. La quantité de fibres à utiliser a été décidée en fonction des résultats du test CBR. La Fig.2.5 montre les résultats des tests CBR effectués sur de la tourbe stabilisée avec 5, 15 et 25% de ciment et 0,1, 0,15, 0,2 et 0,5% de fibres et d'air durcissant les échantillons pendant 90 jours. Les résultats montrent qu'une teneur en fibres de 0,15 % donne les valeurs de CBR les plus élevées.

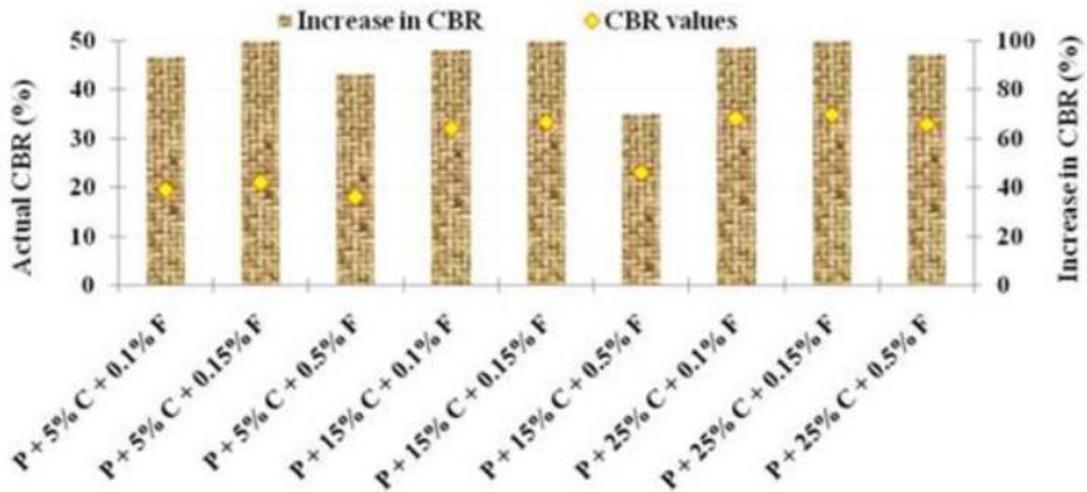


Figure II.11. Augmentation en pourcentage et CBR réel par rapport à la quantité de ciment et de fibres (Kalantari et al. 2012)

Sur la base des résultats, ils indiquent qu'à mesure que la période de durcissement augmente, les valeurs de CBR augmentent également. Avec l'augmentation de la teneur en ciment de 0 à 50 %, les valeurs CBR augmentent également. De plus, un ajout de 0,15 % de fibres aux échantillons de tourbe stabilisée au ciment augmente les valeurs de CBR par rapport aux échantillons sans fibres. Les résultats montrent que le CBR passe de 0,8 % pour la tourbe non remaniée à 145 % pour la tourbe stabilisée avec 50 % de ciment et 0,15 % de fibres. Cette augmentation des valeurs de CBR peut être attribuée à la MOC à laquelle les échantillons ont été compactés et au ciment et aux fibres pour augmenter la résistance des échantillons. On observe que le ciment (15%) et la fibre (0,15%) ont augmenté de manière significative les valeurs UCS et CBR d'un facteur 13,5 et 79, respectivement et par conséquent, il est évident que les fibres peuvent être utilisées pour augmenter la résistance de la tourbe. Il apparaît que les fibres distribuées aléatoirement limitent les plans de faiblesses potentiels et empêchent également la formation et le développement des fissures lors du chargement et donc augmentent l'UCS et le CBR. Le ciment et les fibres peuvent être utilisés efficacement pour améliorer la résistance de la couche de base pour la construction de la chaussée (Kalantari et al. 2012).

Selon Mousavi et Wong (2015), l'effet de la stabilisation de l'argile molle à une teneur en humidité optimale et une densité sèche maximale avec du ciment et du kaolin sur la valeur CBR est illustré à la Fig.2.6. Les résultats de l'étude en laboratoire indiquent une augmentation de la résistance au cisaillement, de la valeur CBR et de la résistance à la compression non confinée du sol traité avec une composition de liant OPC (ciment Portland ordinaire) 8 %, K (kaolin) 2 % et

SS (sable siliceux) 5%. En outre, il a été prouvé que les caractéristiques techniques du sol stabilisé avec une composition de liant OPC 8 %, K 2 % et SS 5 % sont supérieures à celles stabilisées avec des pourcentages inférieurs (c'est-à-dire moins de 2 %) de kaolin. En ce qui concerne la valeur CBR, il a été constaté que la valeur CBR de l'argile stabilisée augmentait légèrement par rapport au CBR de l'échantillon de sol non traité.

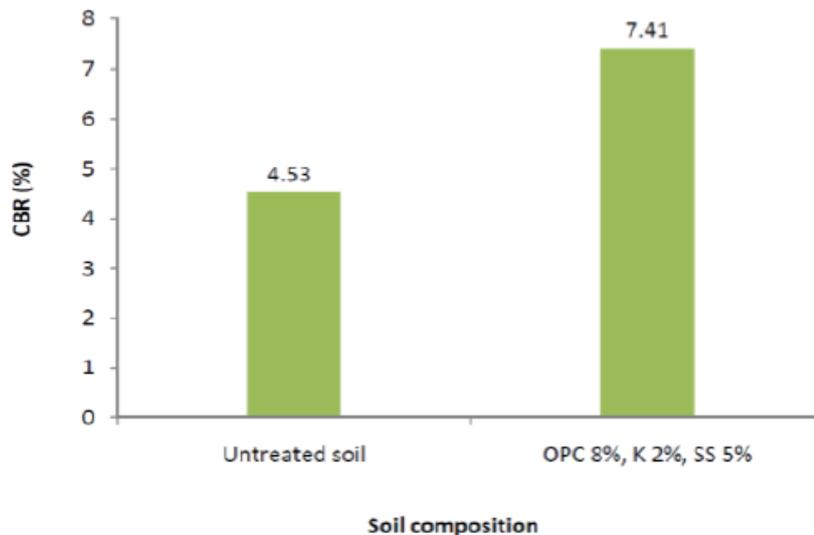


Figure II.12 Effet de la stabilisation sur le CBR du sol (Mousavi et Wong, 2015)

II.5.3 Avantages d'utilisations de fibre dans le renforcement :

Les différents avantages ayant traités avec le renfort des sols fibreux sont les suivants:

- a. Les fibres discontinues sont ajoutées et mélangées au sol, tout comme le ciment, la chaux ou d'autres additifs (Yetimoglu et Salbas, 2003).
- b. La mise en place des fibres in-situ peut être faite en utilisant l'équipement de Construction classique
- c. Les matériaux fibreux sont compétitifs par rapport aux autres matériaux (Crockford et al., 1993; Gregory et Chill, 1998).
- d. Contrairement à la chaux, du ciment et d'autres procédés de stabilisation chimique, la construction à l'aide de fibres de renfort n'est pas significativement affectée par les conditions climatiques (Li, 2005 ; Tang et al, 2008).
- e. Les matériaux qui peuvent être utilisés pour le renforcement des fibres sont largement disponibles tels que les racines des plantes, les pneus déchiquetés, et des fibres de déchets recyclés (Foose et al., 1996; Murray et al., 2000; Consoli et al., 2002).

II.6 Les paramètres géotechniques des sols et le compactage :

I.6.1 Classification GTR et norme NF P 11-300 :

Les sols sont des matériaux naturels, constitués des grains qui peuvent être de dimensions très variable : des argiles aux blocs. Les sols sont de nature et d'origine géologique diverses : alluvions, matériaux simple sédimentaire, dépôts glacières, sols résiduels

L'utilisation des sols est liée à leur classification et à leur comportement lors de leur mise en place. Le GTR édition 2000 (Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC, SETRA, 2000) et la norme qui en découle NF- P 11-300 proposent une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. (Hedadcha Abdennour. G 2021)

Tableau II.1: classes principes dens le GTR

Classe	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ passant à $80\mu\text{m} > 35\%$	A1 à A4 selon VBS ou IP
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ passant à $80\mu\text{m} > 35\%$	B1 à B6 selon VBS ou IP et tamisât
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50 \text{ mm}$ passant à $80\mu\text{m} > 12\%$ ou passant à $80\mu\text{m} \leq 12\% + \text{VBS} > 0.$	sous-classes selon VBS ou IP et tamisât à 50 mm
D	Sols insensible à l'eau avec fines	$\text{VBS} \leq 0.1$ passant à $80\mu\text{m} \leq 12\%$	D1 à D3
E	Matériaux rocheux	Nature pétrographique (norme NF P 11-300)	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	Teneur en éléments chimiques (norme NFP 11-300)	

I.6.1.1 Les paramètres de comportement mécanique

Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et sont donc utilisables en CDF, et les matériaux qui risquent de se fragmenter et nécessiteront des dispositions particulières de traitement. Les paramètres suivants sont retenus pour la classification des matériaux rocheux :

- ✓ Coefficient de Los Angeles LA (norme P 18-573)
- ✓ Coefficient micro Deval en présence d'eau MDE (norme P 18-572) LA et MDE concernent les roches dures comme le granit, le gneiss, le calcaire et le grès et leur possibilité de réemploi en CDF ou couche de chaussée

- ✓ Coefficient de friabilité des sables FS (norme P 18-576)

Seuils retenus par le GTR pour la classification géotechnique des sols :

- ✓ **45** pour les valeurs LA et MDE
- ✓ **60** pour la valeur FS

Par ailleurs les paramètres suivants sont utiles pour le traitement de sol car ils permettent de définir les conditions de malaxage :

- ✓ Coefficient de fragmentabilité FR (éléments grossiers >50mm) (norme NF P 94 066)
- ✓ Coefficient de dégradabilité DG (abrasivité fraction grenu >0,08mm) (norme XP P 18-579)
DG concerne surtout les remblais en matériaux issus de roches argileuses (marnes, schistes..).

➤ **L'indice portant immédiat (IPI)**

IL exprime la valeur du **poinçonnement CBR** mesurée sans surcharge ni immersion d'une éprouvette de sol compacté à l'énergie **Proctor normal**

I.6.1.2 Compactage

Compacter un sol consiste à faire diminuer son volume par l'application d'un procédé mécanique. Cette diminution du volume ne se produit que par l'élimination des vides remplis d'air qui existe dans le sol à son état initial.

Le compactage sert à supprimer les déformations ultérieures (les tassements du remblai, déformations de chaussée...), l'augmentation des caractéristiques mécaniques (augmenter la portance, permettre aux matériaux de résister au trafic routier), et sert aussi à assurer l'imperméabilité car le compactage est la première des protections contre l'agression de l'eau.

➤ **Portance**

La capacité portante d'un sol se caractérise par sa résistance au tassement en fonction de la cohésion et des frottements internes. La mesure de cette portance déterminée par l'indice **CBR** ou **IPI** ou par le module **EV2** de l'essai de plaque.

➤ **L'indice CBR (norme NF P 94-078)**

L'essai CBR (Californian Bearing Ratio) est effectué aussi bien sur le sol de fondation d'une structure de chaussée que sur les matériaux qui la constituent.

A partir de cet essai on définit un indice empirique dit « indice de portance californien », pour deux états : indice CBR immergé (= ICBR après 4 jours d'immersion) et indice CBR immédiat.

Cet indice sert pour le dimensionnement d'une structure de chaussée, se calculent ainsi par le rapport entre la pression d'enfoncement du sol et celle d'un matériau type référencé (en %) :

- ✓ Pression à 2.5 mm d'enfoncement / 0.7
- ✓ Pression à 5.0 mm d'enfoncement / 1.0

Le plus grade des 2 valeurs qui est retenus

L'indice **CBR immergé** se distingue de l'**IPI** par l'immersion du moule pendant 4 jours

II.7 Conclusion :

Il est donc nécessaire d'avoir des connaissances sur les différentes méthodes pour bien choisir la bonne structure de chaussée et même sur l'amélioration des sols médiocres avec une méthode de renforcement qui convient c'est pour cela nous allons voir dans le chapitre suivant les différents fibres qu'on peut utilisés pour le renforcement dans le domaine de la construction.

On s'attend à ce qu'il y ait une amélioration du comportement des sols stabilisés avec du ciment et renforcés avec des fibres, et cela doit être étudié. Ainsi, la prise en compte du comportement du sol serait très importante,

Chapitre III:
Etude
expérimentale

III.1 Introduction :

La caractérisation des matériaux utilisés dans la stabilisation du sol joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures.

De ce fait, la normalisation des modes d'essais sur les sols étudiés, selon les normes en vigueur, devient une condition nécessaire pour l'obtention des sols avec des résultats expérimentaux comparables avec ceux donnés dans la littérature.

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux à utiliser, la représentation du mode opératoire et la norme des essais d'identification effectués sur les échantillons de sol en provenance du site, avant et après la stabilisation (Proctor modifiés, CBR, UCS).

Les matériaux utilisés dans notre étude sont des matériaux locaux, nous avons effectué des essais expérimentaux qui concernent leurs caractéristiques au laboratoire de mapa inserte wilya d'aine defla (djendal).

III.2 matériaux utilisés:

III 2.1 Sable:

Le matériau utilisé dans ce travail est le sable d'Oued Chlef.(Fig. III.1.). Ce sable a été utilisé par de nombreux chercheurs (Bouri et al. 2019, Brahim et al. 2018). Le sable de Chlef est un sable moyen, avec un diamètre moyen $D_{50} = 0,61\text{mm}$. La figure III.2 montre la courbe granulométrique du matériau utilisé, cette courbe a été obtenue par tamisage sur une série complète de tamis. Le sable utilisé dans cette étude est un sable naturel qui contient un pourcentage de fine égale à 20%. Le Tableau III.1 résume les caractéristiques physiques du sable utilisé.



Fig III.1 : Sable naturel utilisé

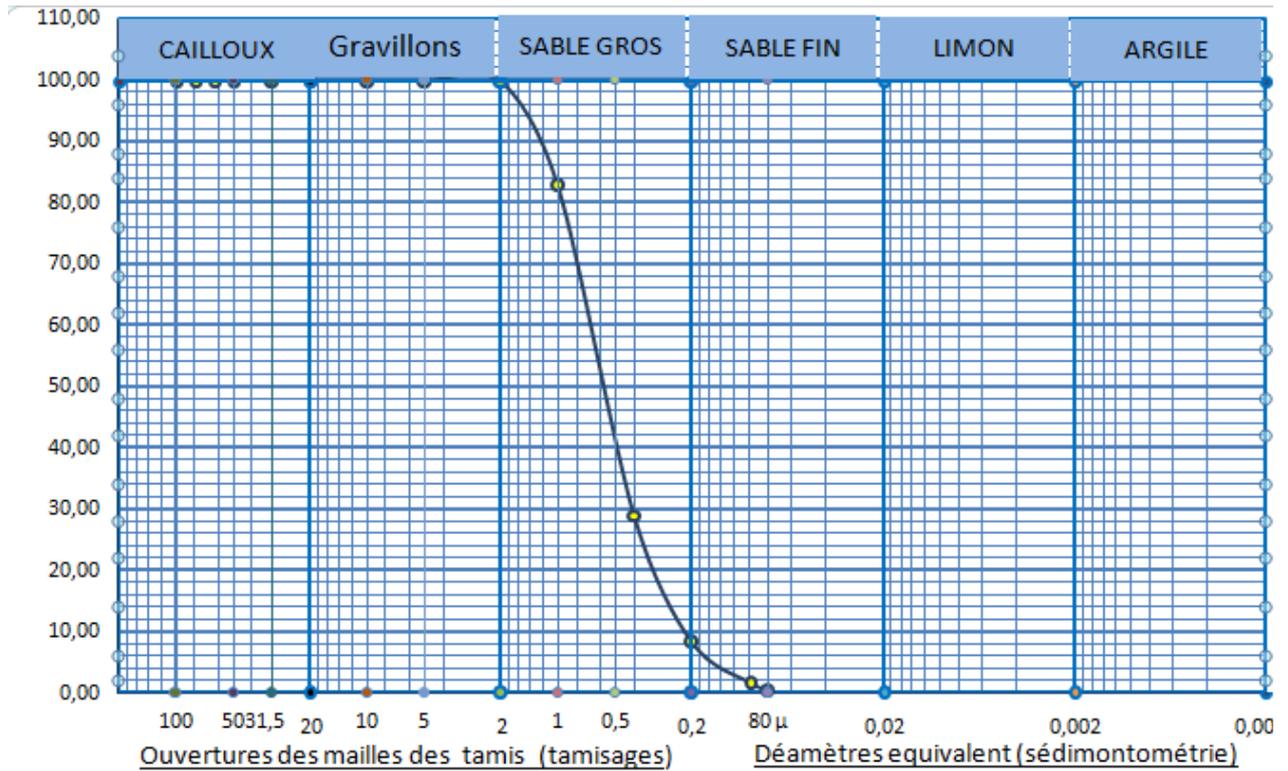


Fig III.2 : Courbe granulométrique du sable naturel utilisé. (NFP:94-056).

➤ **Caractéristique physique du sable utilisé :**

Tableau III.1: Propriétés du sable naturel utilisé.

Propriétés	Sables de Chlef (Sable naturel)
Masse spécifique des grains solides (g/cm ³)	2,65
e_{max}	0,69
e_{min}	0,45
e	0,60
$Cu (D_{60}/D_{10})$	3,45
Cc	1,04
Forme des particules	Arrondie

$Cc = D_{30}^2 / (D_{10} D_{60}) = 1,04$ donc $1 < Cc < 3$ on peut dire que le sable est bien gradué

III.2.2Ciment:

Les ciments GICA (32,5 N) de Chlef issue du broyage de clinker et de sulfate de calcium (gypse ou anhydrite) pour régulariser la prise, et éventuellement de constituants secondaires en faible quantité (inférieure à 5 %). La teneur en clinker est au minimum de 80% à 94%. Le tableau montre les caractéristiques physique, mécanique et chimique du ciment utilisé.

Tableau III.2 : montrent les caractéristique physique, mécanique et chimiques du ciment.

Caractéristique physique	
Temps de prise	Stabilité
≥75 minutes	≤ 10 mm
Caractéristique mécanique	
Résistance a la compression a 07j	Résistance a la compression a 28j
≥16 ,0 N\mm ²	≥ 32,5 N\mm ²
Caractéristique chimiques	
Teneur en sulfates (so3)	Teneur en chlorures (cl)
≤ 3,5%	≤0,10%

III.2.3Fibres:

Le type de fibre utilisée dans cette étude était une fibre de polypropylène mono-filament blanc avec des sections transversales circulaires, une longueur moyenne de 12 mm et un diamètre de 34µm (figure III.3). Les propriétés physiques de la fibre sont indiquées dans le tableau III.3 Le choix de cette gamme de teneur en fibres repose sur des études antérieures (Consoli et al. 2009, Hamidi et Hooresfand 2013, Eldesouky et al. 2016, Eskisar et al. 2016), qui ont montré que la résistance optimale des sables renforcés par des fibres de polypropylène ont été obtenus pour des teneurs en fibres comprises 0.0%, 0,2%, 0,5 et 0,8%.

Tableau III.3:Propriétés de la fibre de polypropylène

Couleur	blanche
Nature	synthétiques
Poids spécifique (g /cm ³)	0.91
Longueur	12mm
Absorption d'eau	0
Diamètre	34µm
Contrainte de traction	570-660 Mpa



Fig III.3: Fibre de polypropylène utilisée dans les essais.

III.2.4 Calcul du pourcentage des fibres et du ciment:

Dans cette étude on a fixé le pourcentage du ciment qui est égale à 5%, ce pourcentage a été choisis selon la littérature (s.v.krishnarao .Ahmed .a.nasr, Amir Hamidi, Mahdi Hooresfand 2013, Bazazorde, S. M. (2018), par contre on a varié la teneur en fibres de polypropylène (pf) qui est égale 0, 0.2, 0.5 et 0.8%. à cet effet les échantillons ont été préparés avec plusieurs pf pour l'essai de compactage Proctor, l'essai CBR, l'essai UCS. Ils se sont obtenus comme suit :

1) **Pourcentage des fibres** : les pourcentages des fibres sont calculés comme suit :

$$Pf = \frac{Wf \times 100}{Ws}$$

pf : Pourcentage de fibre, Ws : poids de sable utilisé, wf = poids de fibre.

2) **Poids de ciment** : le pourcentage du ciment est calculé comme suit :

$$Pc = \frac{Wc \times 100}{Ws}$$

Pc = pourcentage du ciment

Tableau III.4 : Différentes combinaisons de sable-ciment-fibre étudiées.

Mélange	Ciment (%)	Fiber de PP (%)	Période de cure(jours)
Essai proctor			
Sable + Ciment	5	0	0
Sable + Ciment + fiber	5	0.2, 0.5, 0.8	0
Essai CBR			
Sable + Ciment	5	0	0
Sable + Ciment + fiber	5	0.2, 0.5, 0.8	0
Essai UCS			
Sable + Ciment	5	0	7,14
Sable + Ciment + fiber	5	0.2, 0.5, 0.8	7, 14

III.3 Essais réalisés :

III 3.1 Essai Proctor normal :

Essai Proctor normale est un essai qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire, avec une dame de compactage normalisée tout en contrôlant la hauteur de chute afin d'avoir la même énergie de compactage, nombre de coups 25 coups par couche, (trois couche). (NF P98-093)



moule proctor



la dame

Fig III.4 : Matériel utilisé

➤ **MODE OPERATOIRE :**

- Peser l'ensemble du moule vide + embase (soit P_m).
- Prendre 2.5 Kg de sol sec passé au tamis 2mm.
- Pour chaque essai On applique les calculs précédents.

Chapitre III : Etude expérimentale

- Dans une assiette on met 2500 g de sable + 125 g de ciment est malaxé bien.
- Ajouter différent pourcentage d'eau. (10%, 12% ,14%,16%, 18%).
- Ajouter le Pourcentage de fibre qui a été déjà calculer (0% .0.2%. 0.5% 0.8%).
- Changer le pourcentage de fibre.
- Introduire la 1ère couche de sol et compacter en 25 coups. Scarifier la surface compactée.
- Procéder de manière identique pour les couches suivantes jusque trois couches.
- Enlever l'embase et prélever deux prises sur l'échantillon, et en déterminer la teneur en eau.
- Passer à l'étuve (24 heure à 105C).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. III.5 ; mode opératoire (a) sable sec + ciment, (b) ajoutée l'eau, (c) malaxé bien, (d) ajoutée % fibre, (e) compacté le mélange

III.3.2 Essai C.B.R immédiat :

L'essai CBR est un essai qui caractérise la portance d'un sol du point de vue routier. Il s'agit d'un essai totalement empirique et qui n'est pas relié aux caractéristiques intrinsèques (ϕ , c) du matériau étudié. L'échantillon de sol étudié est compacté dans un moule (moule CBR $\phi = 15,2$ cm, hauteur : 15,2 cm) après avoir été amené à une teneur en eau homogène et bien définie.

Il est ensuite poinçonné et on déduit de la pression nécessaire à ce poinçonnement (les modalités du poinçonnement sont normalisées) un indice qui caractérise la qualité routière du matériau dans les conditions de compacité et de teneur en eau de l'essai. (NF P94-093)



Fig III.6 : appareil de mesure CBR

➤ **But de l'essai :**

L'essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers. Il s'agit de déterminer expérimentalement des indices portants (CBR) qui permettent : Etablir une classification des sols (GTR)

Evaluer la traficabilité des engins de terrassement

Déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augment \Rightarrow épaisseur diminue).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fig III.7 : Matériels utilisés CBR(a)Moule CBR,(b) La dame,(c) disques de surcharge, (d) disques de surcharge 1, (e) disques de surcharge 2

➤ Mode opératoire :



a)



b)



c)



d)

Fig III.8 : Mode opératoire a) Après compactage, b) Placé les deux disques de surcharge, c) Muser ICBR, d) La trace de machine CBR

- Peser l'ensemble du moule vide + embase (soit P_m)
- Prendre 5.5Kg de sol sec passé au tamis 2mm
- Pour chaque essai On applique les calculs précédents
- Dans une assiette on met 5500 g de sable + 275 g de ciment est malaxé bien
- Ajouter la teneur en eau optimum qui a été déjà déduite dans l'essai Proctor. (11%)
- Ajouter le Pourcentage de fibre qui a été déjà calculer (0% .0.2%. 0.5% 0.8%)
- Pour tout l'essai changer de pourcentage de fibre

- Introduire la 1ère couche de sol et compacter en 56 coups. Scarifier la surface compactée.
- Procéder de manière identique pour les couches suivantes.
- Enlever l'embase et prélever deux prises sur l'échantillon, et en déterminer la teneur en eau
- Placer l'ensemble dans la machine et lire la force et déplacement

➤ **Portance du sol :**

La portance d'un sol est la caractéristique qui définit sa capacité à supporter les charges qui lui sont appliquées. La portance dépend de la nature du sol, du pourcentage d'eau et du degré de compactage. Quel que soit le sol, sa résistance mécanique augmente avec sa densité en faisant passer plusieurs fois des engins lourds qui assurent le compactage. La portance du sol et sa teneur en eau optimum sont déterminées par l'essai Proctor. Les paramètres de portance obtenus suite à l'essai de poinçonnement immédiat et après quatre jours d'immersion.

ICBR est. le Max des deux values

À 2,5mm: P (2, 5)/0.7

À 5mm: P (5)/1.05

Classes de portance	CBR [%]
S ₀ portance très faible	CBR < 3
S ₁ portance faible	3 < CBR < 6
S ₂ portance moyenne	6 < CBR < 12
S ₃ portance élevée	12 < CBR < 25
S ₄ portance très élevée	25 < CBR

III.3.3 Essais UCS :

L'essai de compression uni axial est effectué sur une éprouvette de dimensions : 5cm de Ø et 10cm de hauteur, avec une vitesse de déformation constante de 1 mm/min jusqu'à la rupture. Pendant l'essai la déformation axiale est mesurée avec un capteur de déplacement type LVDT placés sur le piston. La force appliquée sur l'échantillon est mesurée avec un capteur de force fixé placé entre le vérin et le piston. (NORME ASTM D2166)



Fig III.9 :L'appareil pour UCS

III.3.3.1 Dessiccateur :

Un dessiccateur est un équipement servant à protéger des substances contre l'humidité. Au laboratoire, il est constitué d'une cuve circulaire surmontée d'un couvercle ; l'ensemble est en verre épais ou en polycarbonate. La liaison des deux parties peut être réalisée par un rodage en verre ou un joint torique en élastomère.



Fig III.10 : Dessiccateur

➤ **Mode opératoire :**

- Tamiser le sable sec à 2 mm de diamètre. (3 kg pour 8 éprouvettes)
- Pour chaque essai On applique les calculs précédents
- Dans une assiette on met 314 g de sable + 20% de fin est malaxé bien est après Ajouter 15.7 g de ciment
- Ajouter la teneur en eau optimum qui a été déjà déduite dans l'essai Proctor. (12%)
- Ajouter le Pourcentage de fibre qui a été déjà calculer (0% .0.2%. 0.5% 0.8%)
- Pour tout l'essai changer de pourcentage de fibre
- Diviser la quantité par cinq ,puis chaque couche est damé à 25 coups pour chaque couche, Nous damons les quatre couche sauf la dernière couche (la couche supérieure).
- Laisser reposer l'échantillon pendant 7 jours et 14 jours à l'intérieur d'un sac fermé dans un Dessiccateur.
- Réaliser l'essai.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig III.11 : Préparations des mélanges :(a) Sable sec, (b) Sable sec + ciment, (c) Ajout d'eau, (d) Ajout % de fibre

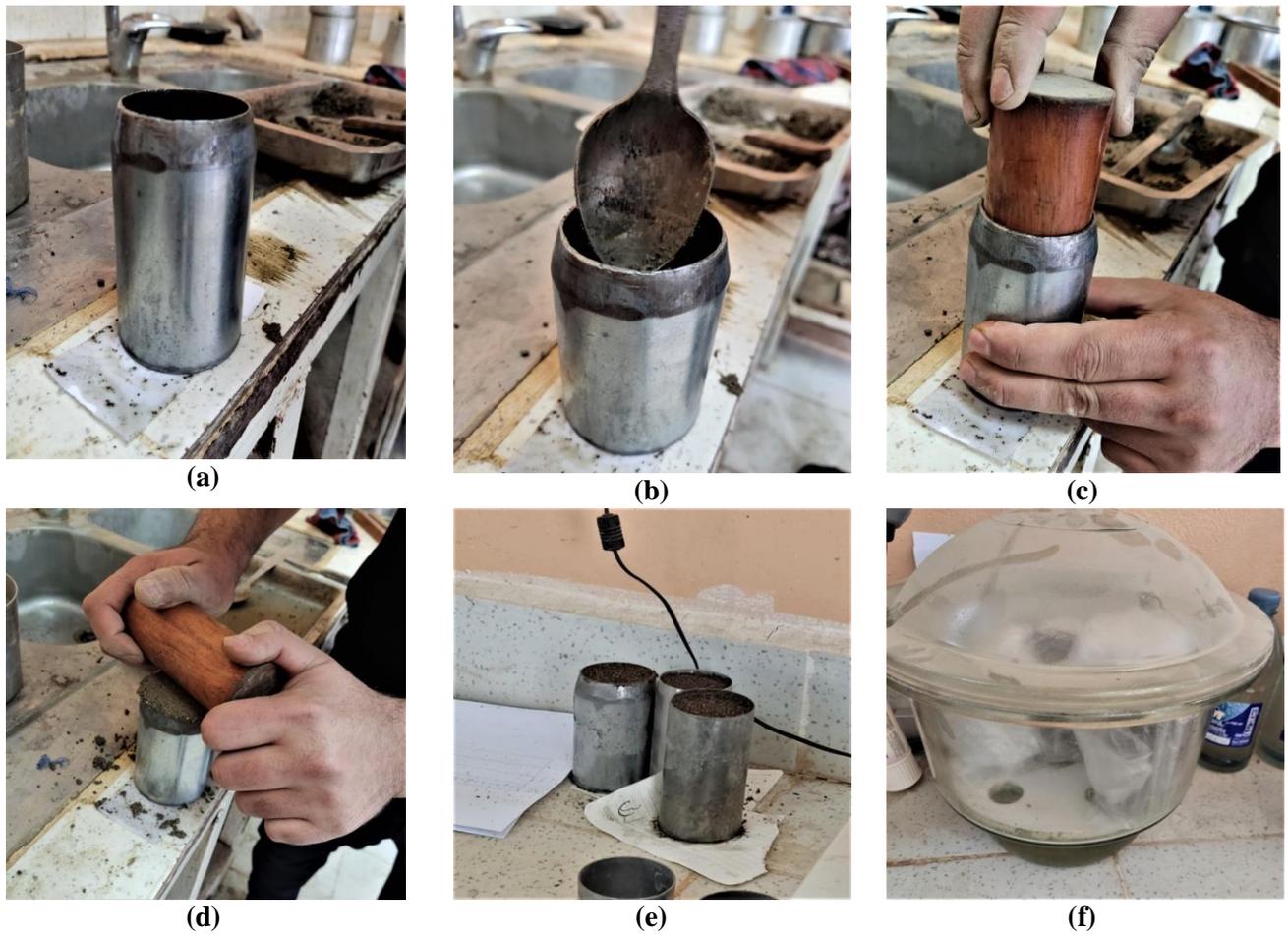


Fig III.12 : Préparations des éprouvettes : (a)moule d'éprouvette (5cm de Ø et 10 cm h), (b) versé le sable, (c) damé la couche à 25 coups,(d) la couche supérieure,(e) extrait les éprouvettes, (f) mettre dans un Dessiccateur

→ **Partie d'essai :**

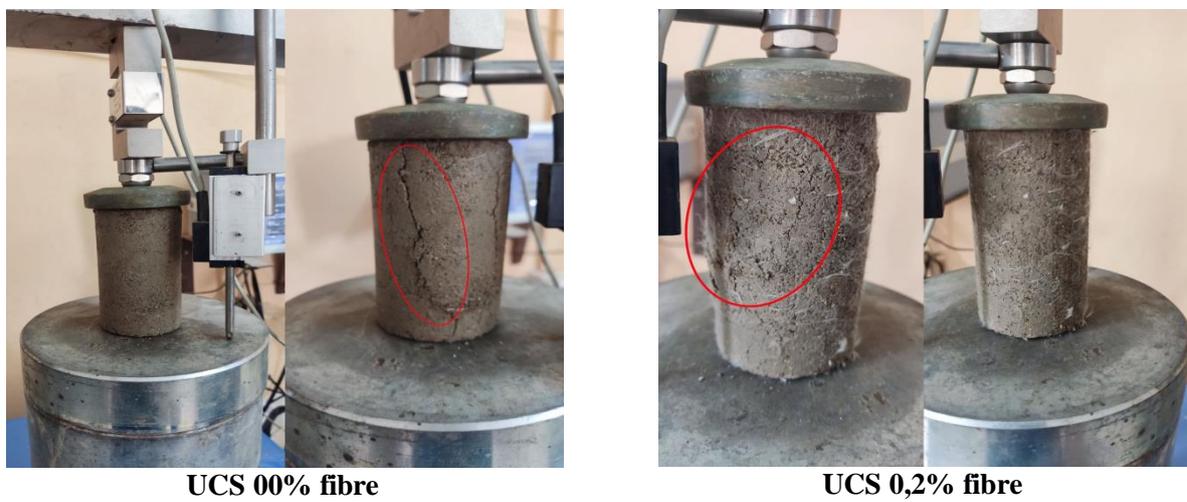


Fig. III.13 Manipulations de l'essai UCS



Fig III.14 : Essai UCS après écrasement à 7 et 14 jours

III.4 CONCLUSION :

En théorie, les essais de laboratoire ou sur site, qui permettent sa reconnaissance par la détermination de ces caractéristiques physiques et mécaniques ce qui nous permet d'avoir une idée sur son comportement à court, moyen et long terme sous l'effet de fibre dans les caractéristiques mécaniques.

Le comportement d'un sol sableux étant affecté par l'inclusion de différentes quantités de fibre de polypropylène. Les essais effectués étaient des compactages standards, Tests UCS et CBR. Le temps de durcissement des échantillons cimentés était de 7, et 14 jours, et trouve la force appliquée dans le test CBR.

Chapitre IV:
Présentation et
discussion des
résultats

IV.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à présenter l'ensemble des résultats des essais effectués sur l'échantillon de sable prélevé de la zone chlef qui a été traité avec les différents pourcentages d'ajouts de fibre polypropylène et le ciment .

Le présent chapitre présente et interprète les différents résultats obtenus lors des essais conduits en laboratoire de mapa insert wilaya d'aine defla (djendal).

Les premiers essais mécaniques Proctor normal pour déterminer la densité sèche du déférent mélange et l'OPM de chaque mélange, CBR pour déterminer la capacité portante de chaque mélange et le dernier essai est la compression simple UCS avec l'influence de la teneur en fibre.

IV.2 Comportement du sable cimenté renforcé par de fibre sur les caractéristiques du compactage :

IV.2.1 Effet de fibre sur les caractéristiques du compactage :

Les résultats du compactage sont présentés dans le Tableau IV.1 :

Tableau IV.1 : Caractéristique de compactage du sable naturel utilisé

%fibre	Wopt (%)	Ydmax (t/m3)
00%	12,175	1,801
0,2%	12,189	1,894
0,5%	12,003	1,908
0,8%	13	1,869

Le tableau IV.1 montre les différents résultats obtenus à partir de l'essai Proctor nous pouvons voir l'influence de la teneur de fibre (0%, 0,2%, 0,5%, 0,8%) avec l'ajout de différent pourcentage d'eau. (10%, 12% ,14%,16%, 18%) jusqu'à une teneur en eau optimum (Wopt (%)). La Fig.IV1 représente l'influence de fibre de polypropylène sur les caractéristiques du compactage, on remarque clairement qu'il ya des résultats similaire de Wopt (%) et la densité séché Ydmax 12% et 18 kN/m3.

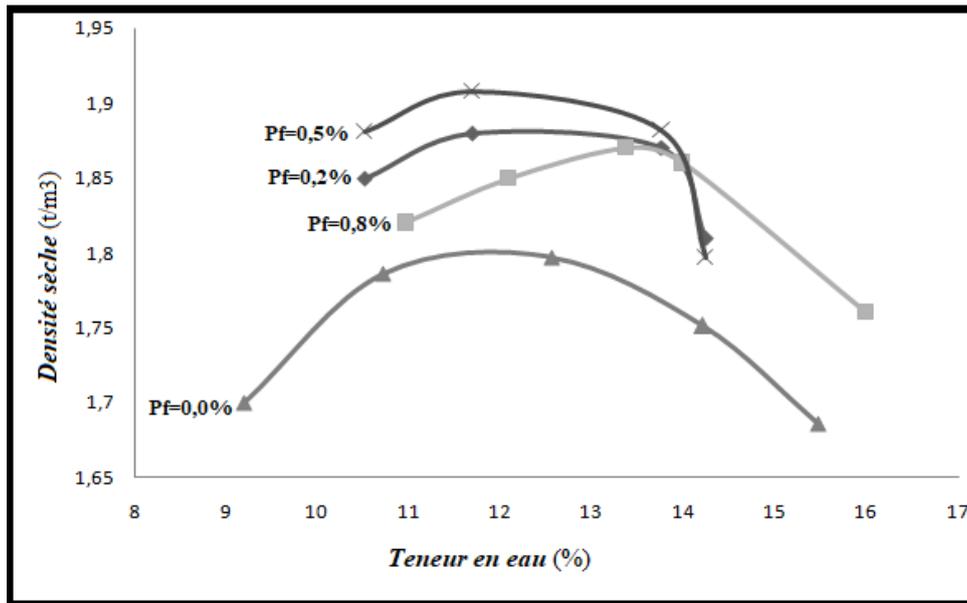


Fig IV.1 : Courbe des essais Proctor pour différents pourcentages de fibres (pp).

IV.2.2 Effet de fibre sur la densité sèche maximale :

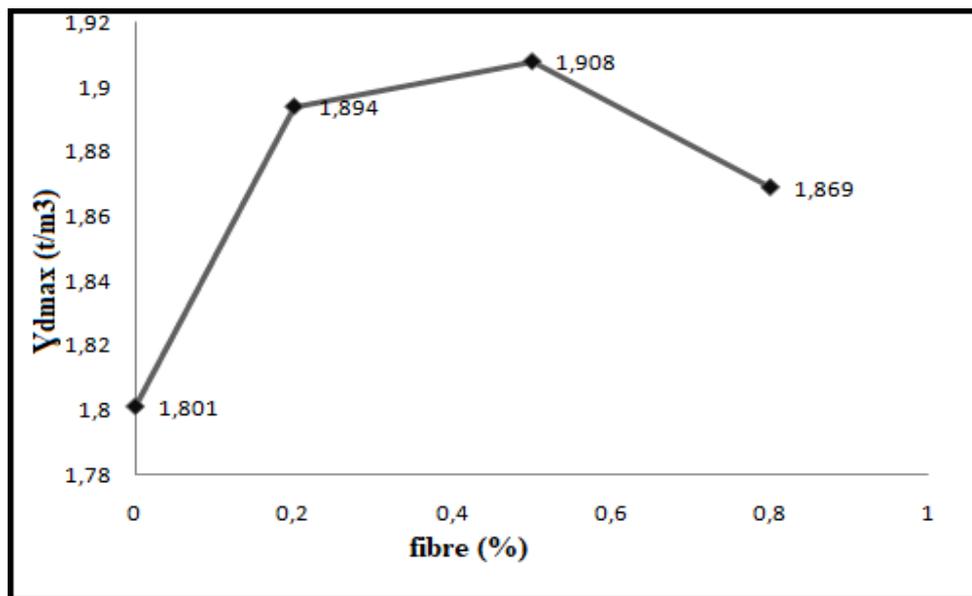


Fig IV.2 : Effet de la teneur en fibre sur la densité sèche maximale.

Dans la Figure IV.2 on observe que les résultats de la densité sèche augmentent quand on ajoute le pourcentage de fibre (0%, 0,2%, 0,5%) puis diminuent à 0,8% par rapport aux valeurs optimales de tous les mélanges. La diminution de la densité sèche confirme la négativité de ce type de sable cimenté avec le contact de fibre. À 0,8 % l'optimum et la densité sèche chute d'environ 1,869 t/m³.

IV.2.3 Effet de fibre sur la teneur en eau optimale :

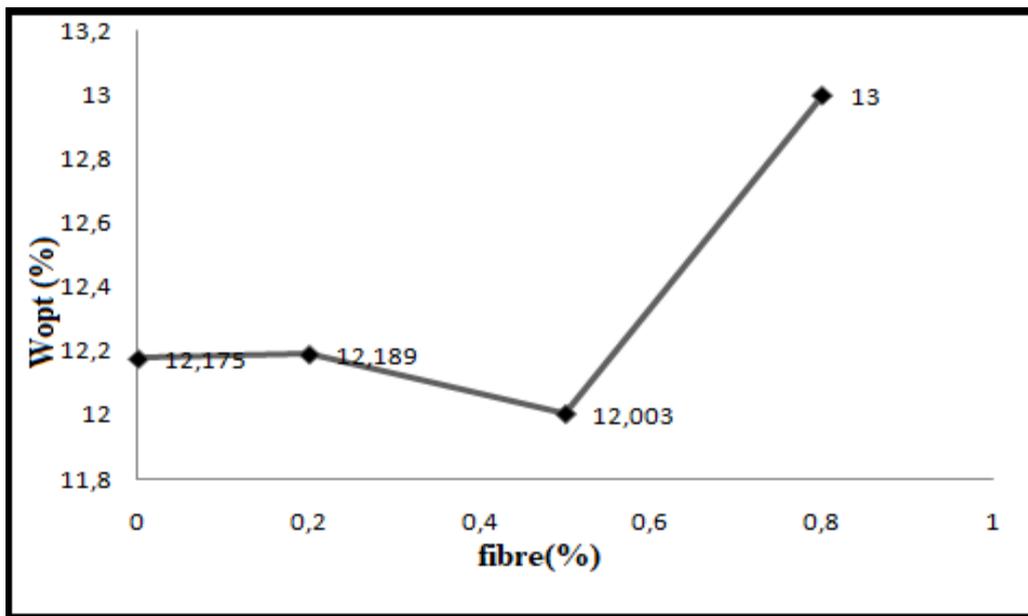


Fig IV.3 : effet de la teneur en fibre sur la teneur en eau.

D'après les Figures IV 1, IV 2, IV3 on observe que l'influence de fibre ajoutée aux mélanges est significativement négative sur la plupart des mélanges ce qui, Environ la même densité sèche pour tous les mélanges varie entre 1,7 à 1,9 et une teneur en eau environ entre 12,003 jusqu'à 13 pour les mélanges de sol stabilisé avec des fibres de polypropylène.

La figure IV 2, IV3 indique la variation de la teneur en eau optimale et la densité séché maximal avec une teneur en fibres (fp) de (0%, 0,2%, 0,5%, 0,8%). On observe que l'ajout de fibres de polypropylène dans le sol généralement n'affecte pas sur le sable cimenté.

IV.3 Effet de fibre de polypropylène sur CBR :

Le tableau IV.2 montre les résultats obtenus lors d'un essai CBR :

ICBR est le Max des deux valeurs

À 2,5mm: P (2,5)/0,7

À 5mm: P (5)/1,05

Tableau IV.2 : Résultats des essais C.B.R.

Fibre (%)	Indice CBR
0%	12,76
0,2%	12,76
0,5%	19,02
0,8%	21,11

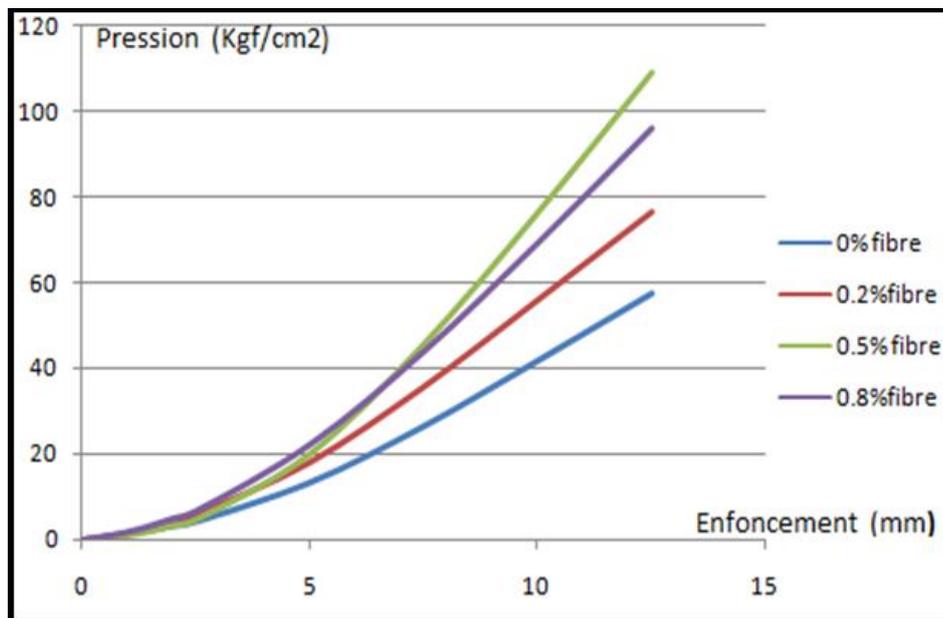


Fig IV.4 : Effet de fibre PP sur le comportement du sable au poinçonnement immédiat.

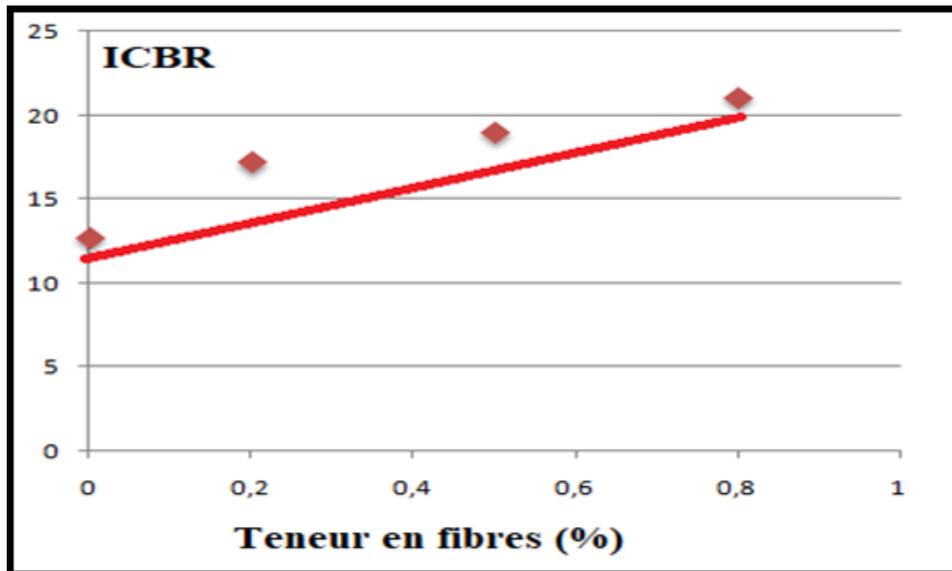


Fig IV.5 : Effet de l'ajout de PP sur le CBR du sol traité à l'état Immédiat

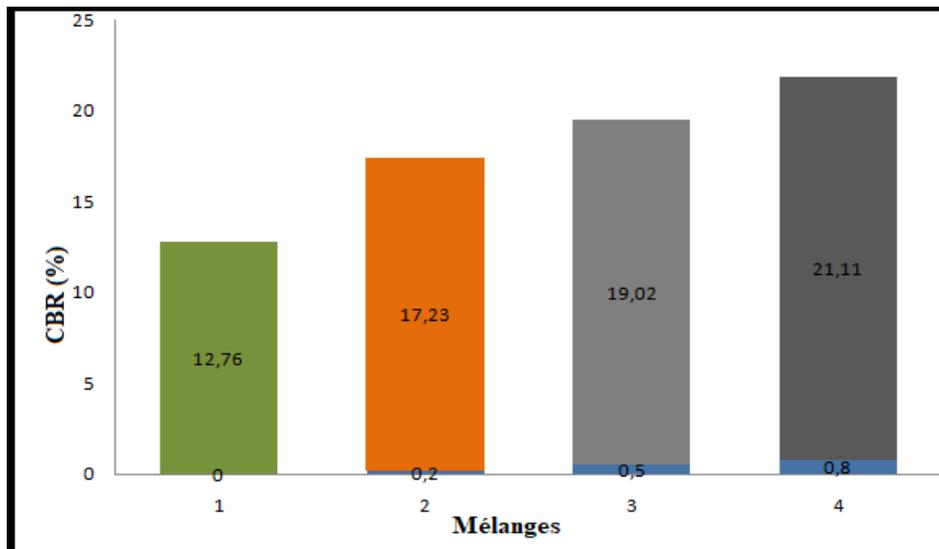


Fig IV.6 : Effet de l'ajout de PP sur le CBR du sable traité à l'état Immédiat

Les Figures IV.4, IV.5 et IV.6 présentent l'effet des ajouts de différent pourcentage (0%.0.2% .0.5% .0.8%) de fibre polypropylène pour les résultats du CBR. Les résultats du CBR de différents mélanges ont montré un indice de CBR élevé de 12 jusqu'à 21 pour les échantillons avec fibre à 0.8%. De plus, on a comparé ces résultats aux mélanges avec une teneur en eau optimale trouvée dans la thèse de Seyed M. A. Bazazorde 2018 Il a trouvé que l'indice CBR atteignait a 21,11 Addition d jusque à 0,8%de fibre, (la portance de sable de chlef élevée (S3)).

IV.4 Effet de fibre de polypropylène sur la résistance à la compression non confiné (UCS):

Il a été remarqué que, comme prévu, la teneur en fibres de polypropylène ont un effet important sur la résistance de ces mélanges sable-fibre. Une petite différence dans la teneur en fibre a un impact significatif sur les performances des spécimens. Spécimens du moule étaient soigneusement extraits et placés dans des sacs en plastique scellés pendant 7, 14 jours.

IV.4.1 Résistance à la compression non confiné à 7 jours :

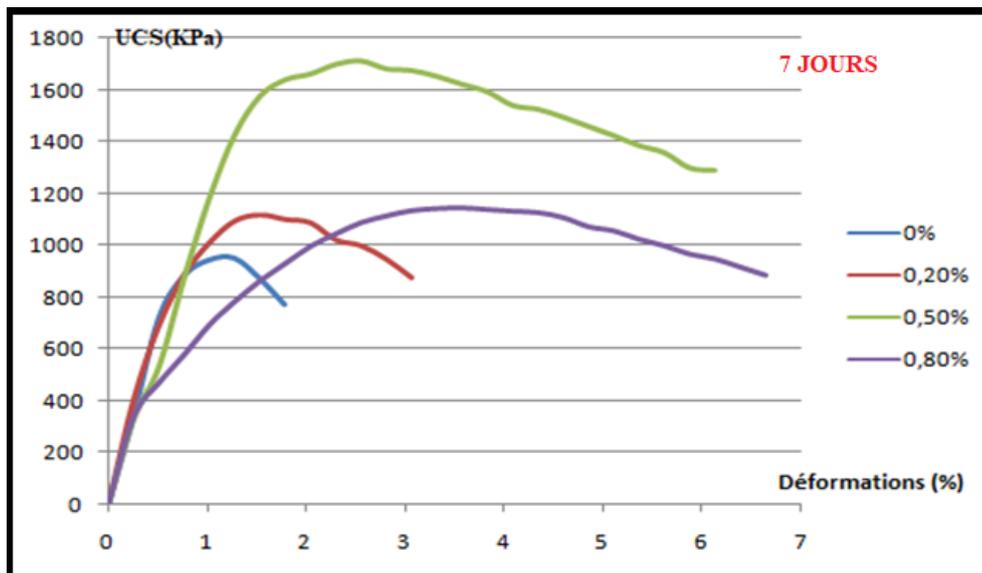


Fig IV.7 : Courbe résistance-déformation du sable cimenté à (7J).

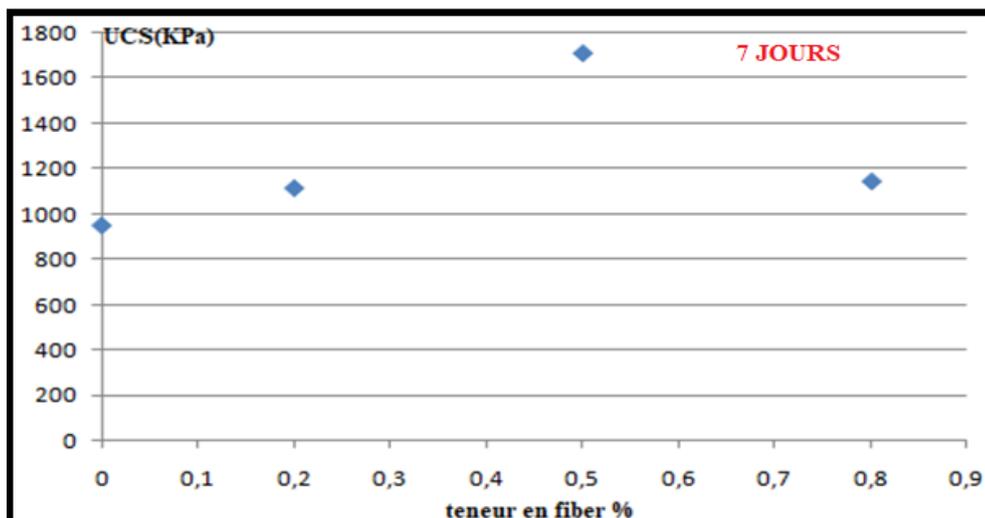


Fig IV.8 : Effet de l'ajout de fibre sur le sable cimenté à (7J).

D'après les figures IV.7 et IV.8 donne un résumé des valeurs mesurées la résistance maximale (UCS) après 7 jours la courbe déformation axiale/la résistance maximale indique que l'UCS est proportionnel par rapport au pourcentage des fibres avec une vitesse de déformation constante de $1\text{mm}/\text{min}$ jusqu'à la rupture, avec quatre différent pourcentage ont été adoptées pour le sable cimenté : $W_f = 0\%, 0,2\%, 0,5\%, 0,8\%$ Respectivement.

On peut voir que les éprouvettes non renforcé à 0% fibre la contrainte au pic a atteint une valeur maximal de 949,071618 kpa. Mais les résultats de l'UCS pour les sable renforcé avec les fibres sont forte lors de l'ajout de plus de fibre Nous pouvons observer à partir de l'UCS que la valeur maximal de l'ajoute 0,2% de fibre égale à 1114,58886 kpa et pour 0,5% = 1710,87533 Kpa.

Est pour 0,8% de fibre = 1144,29708 kpa. Les résultats diffèrent en post-pic. Il faudra donc augmenter le temps d'application de la charge de façon à obtenir une meilleure superposition avec les autres courbes. De manière générale, plus on raffine le maillage, plus le temps d'application T de la charge doit être augmenté. Le temps de calcul réel augmente alors de manière exponentielle. Il faut donc trouver un équilibre entre la précision que l'on désire et le temps de calcul nécessaire pour l'obtenir.

IV.4.2 Résistance à la compression non confiné à 14 jours :

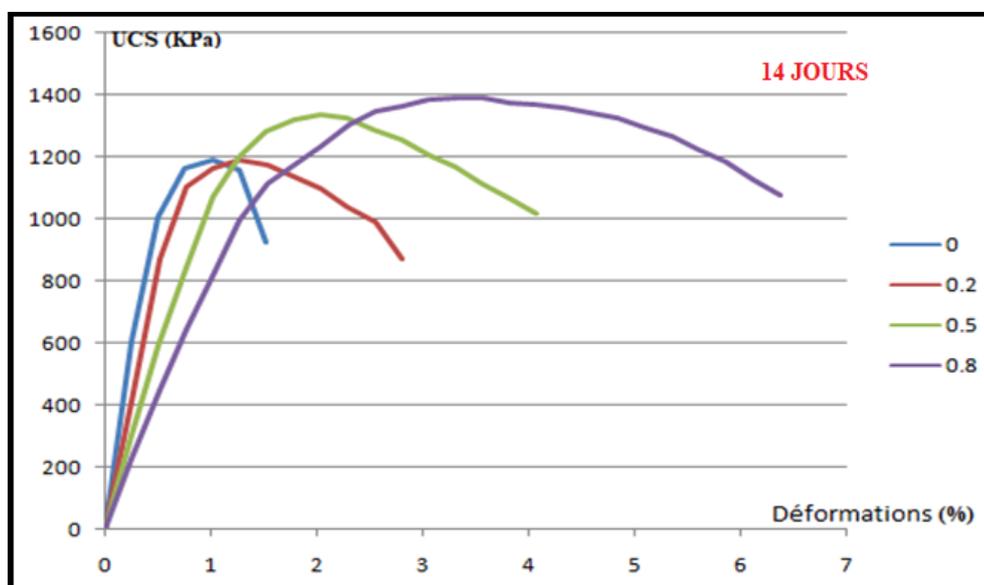


Fig IV.9 : Effet de l'ajout de PP dans UCS du sable cimenté à (14J).

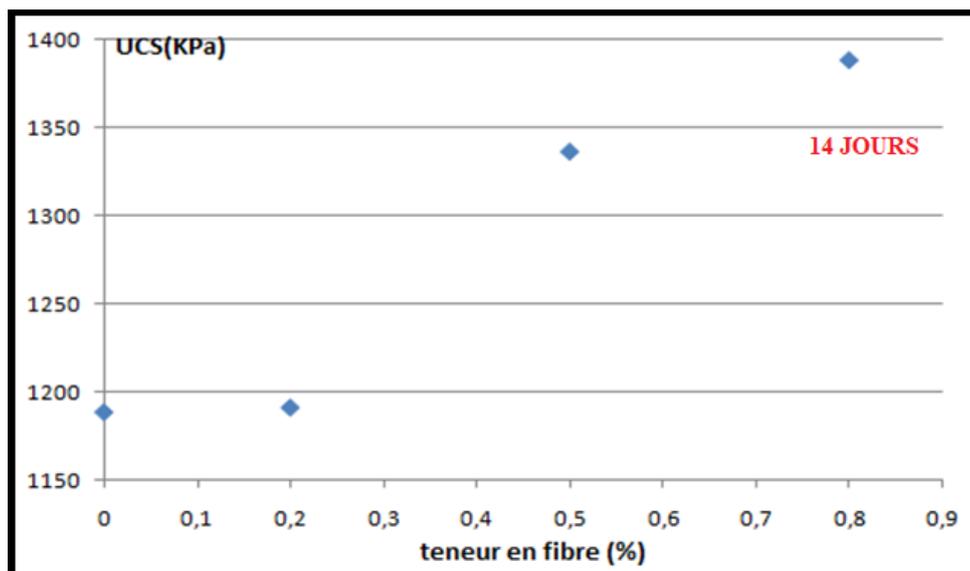


Fig IV.10 : Effet de l'ajout de PT et ciment dans UCS du sable à (14J).

D'après les figures IV.9 et IV.10 qui donne un résumé des valeurs mesurées la résistance maximale (UCS) après 14 jours la courbe la déformation axiale/la résistance maximale. On peut voir que les éprouvettes non renforcé à 0% fibre la contrainte au pic a atteint une valeur maximal de 1188,32891Kpa. Mais les résultats de l'UCS pour les sables renforcé avec les fibres sont forts lors de l'ajout de plus de fibre. Nous pouvons observer à partir de l'UCS que la valeur maximal de l'ajoute 0,2% de fibre égale à 1190,98143 kpa et pour 0,5% =1336,33952kpa.

Et pour 0,8% de fibre = 1388,32891kpa. Les résultats diffèrent en post-pic. Il faudra donc augmenter le temps d'application de la charge de façon à obtenir une meilleure superposition avec les autres courbes. De manière générale, plus on raffine le maillage, plus le temps d'application T de la charge doit être augmenté. Le temps de calcul réel augmente alors de manière exponentielle. Il faut donc trouver un équilibre entre la précision que l'on désire et le temps de calcul nécessaire pour l'obtenir.

IV.4.3 Effet de cure :

Pour étudier les effets de la cure (temps) sur UCS, les deux échantillons de sol améliorés par fibre- ciment, les échantillons ont été testés après une cure de 7 et 14 jours. La résistance du sol augmente significativement avec la cure et le pourcentage des fibres de polypropylène. L'USC de chaque spécimen a été mesuré le jour de la cure et les résultats sont montrés dans la Figure IV.11.

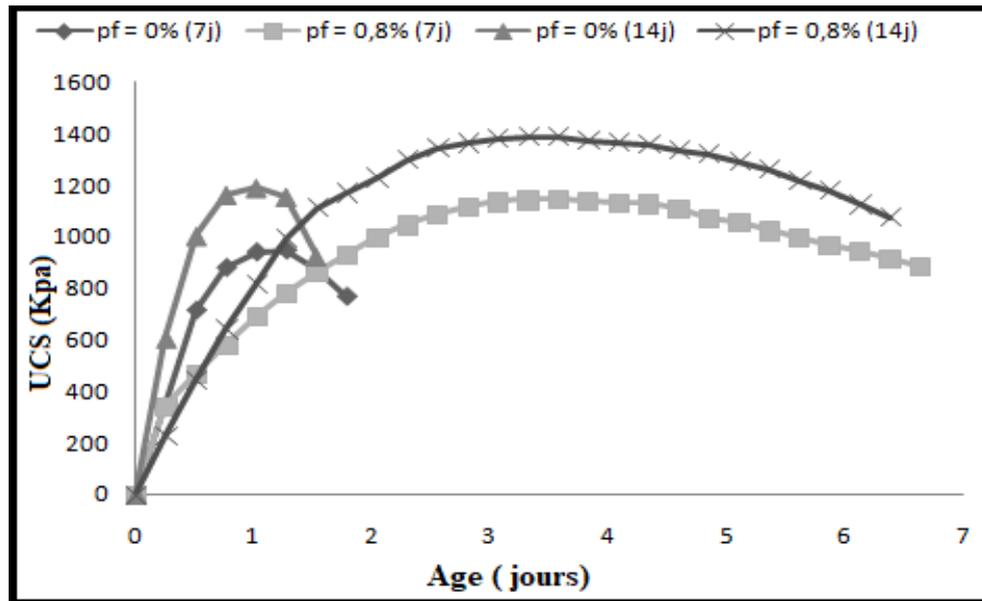


Fig IV.11 : Effet de cure sur la résistance à la compression avec l'ajout de PP.

Dans la Fig. IV.11, les relations entre UCS et la cure pour le sable cimenté renforcé les spécimens sont présentés. Aussi, les effets de fibre polypropylène, et les périodes de durcissement sont clairement mesure que les quantités de fibre ont été augmentées et que les périodes de durcissement ont été prolongées de 7 à 14 jours. Cependant, les valeurs UCS pour le sable renforcé durci à 7 jours était inférieur à ce de échantillon à 14 jours. Les valeurs d'USC pour La résistance à la compression à 14 jours à 0,8% égale à 1388,3289 Kpa comme une valeur maximale, et pour 00% 949,071618 Kpa et la résistance à la compression pour 7 jours à 0,8% égala 1144,29708 Kpa et pour 00 % 1188,32891 Kpa appuyée jusqu'à la rupture.

IV.4.4 Indice de déformation :

Dans cette étude, le terme « indice de déformation » est proposé et défini pour décrire la ductilité de l'USC comme suit :

$$D = \frac{\text{sable renforcé}}{\text{sable non renforcé}}$$

Dans l'éq. Sable renforcé est la déformation axiale à la résistance maximale dans l'USC.

Et sable non renforcé est la déformation axiale à la résistance maximale dans l'USC (les matériaux non renforcés par fibres).

L'indice basé sur la déformation (D) peut être déterminé en comparant la déformation axiale à la résistance maximale de tout spécimen du sable cimenté renforcé par fibres à celle d'un spécimen du sable cimenté non renforcé par fibres. Même si la plupart des définitions sont généralement définies sur une courbe, l'indice de déformation utilise deux courbes contrainte-déformation, pour chaque éprouvette du sable cimenté non renforcée par fibres et pour les éprouvettes du sable cimenté renforcées par fibres, L'indice est utile. Lorsqu'un pic de contrainte ou un état de contrainte résiduelle n'est pas clairement observé. Cependant, ses applications sont limitées aux spécimens de sable cimenté qui ont le même rapport de fibre. L'indice de déformation est calculé :

Tableau IV.3 : Indice de déformations (7j, 14j)

% fibre	Indice de déformations 7j	Indice de déformations 14j
0	1,00	1,00
0,2	1,17	1,00
0,5	1,80	1,12
0,8	1,21	1,17

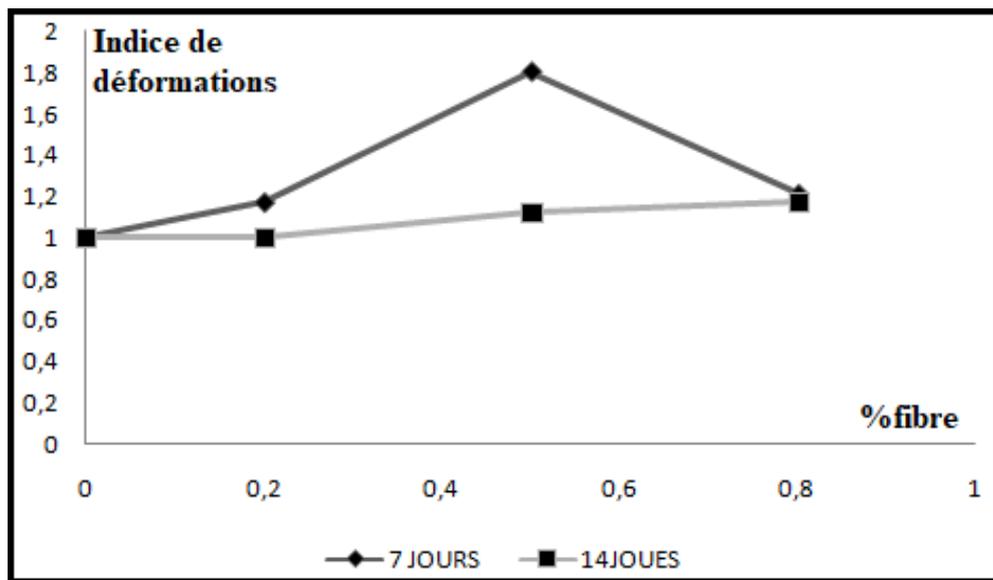


Fig IV.12 : Indice de déformations (7j, 14j) avec pourcentage de fibre

IV.4.5 Module d'élasticité (initiale tangente module) :

Les courbes contrainte déformation des différentes fibres mettent en évidence une zone de non linéarité en début de courbe plus ou moins marquée selon le type de fibre. La deuxième partie de la courbe est linéaire et représente le comportement élastique de la fibre. Le module d'Young est calculé dans cette zone. La présence de cette zone de non linéarité en début de courbe est attribuée à une réorientation des fibrilles de celluloses qui sont orientées par rapport à l'axe de la fibre.

La rigidité et la capacité de ductilité des matériaux utilisés dans les applications géotechniques sont élevées importance. Ouvrages divers ont des exigences de résistance et de déformation différentes en fonction de L'application. Par conséquent, la compréhension du comportement de rigidité des mélanges utilisés dans le courant travailler est bénéfique. De la moyen contrainte-déformation courbes de différent mélanges, la axial

à 0,5 % valeurs étaient obtenu, et leur variation avec fibre contenu (pf) est présentée dans les tableaux IV.4 pour le teneur (pf) de 0 et 0,2 et 0,5 à 0,8 %, respectivement. Pour enquêter la raideur du sablonneux sol affecté par l'ajout fibre, la sécante tangente module d'élasticité (E) pour chaque mélange a été calculé de la moyenne stresser- souche courbes utilisant la Suivant équation et présenté dans Tableau IV.4.

Le module d'élasticité est le rapport entre la contrainte(ou compression) σ et la déformation d'un matériau élastique ε

- De loi de Hook :

$$Y = ax$$

$$\rightarrow \sigma = \frac{E}{\varepsilon}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

- module de Young :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Tableau IV.4 : Variation du module d'élasticité en fonction du pourcentage des fibres.

Fibre %	Période (jours)	Sécante module d'élasticité (kPa)
0,0	07	140579,333
0,2	07	135172,435
0,5	07	104186,754
0,8	07	92021,2348
0,0	14	196519,925
0,2	14	170317,269
0,5	14	115416,464
0,8	14	87654,1254

IV.4.5.1 module d'élasticité et la teneur en fibre à 7, 14 jours :

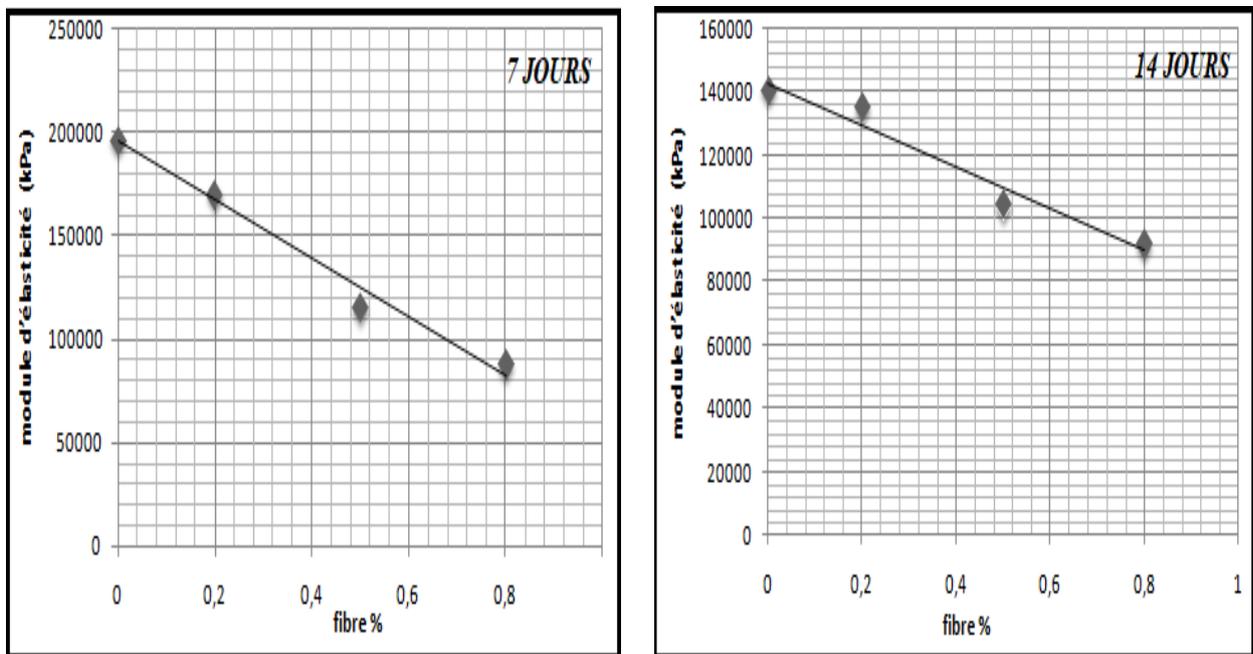


Fig IV.13 : module d'élasticité fonctions de pourcentage de fibre à 7, 14 jours

On constate que le sable de chlef est peu rigides ils sont souples, élastiques. Selon la littérature (s.v.krishnarao .Ahmed .a.nasr, Amir Hamidi, Mahdi Hooresfand2013, Bazazorde, S. M. (2018),)

IV.5 Déformation finale des éprouvettes après écrasement :

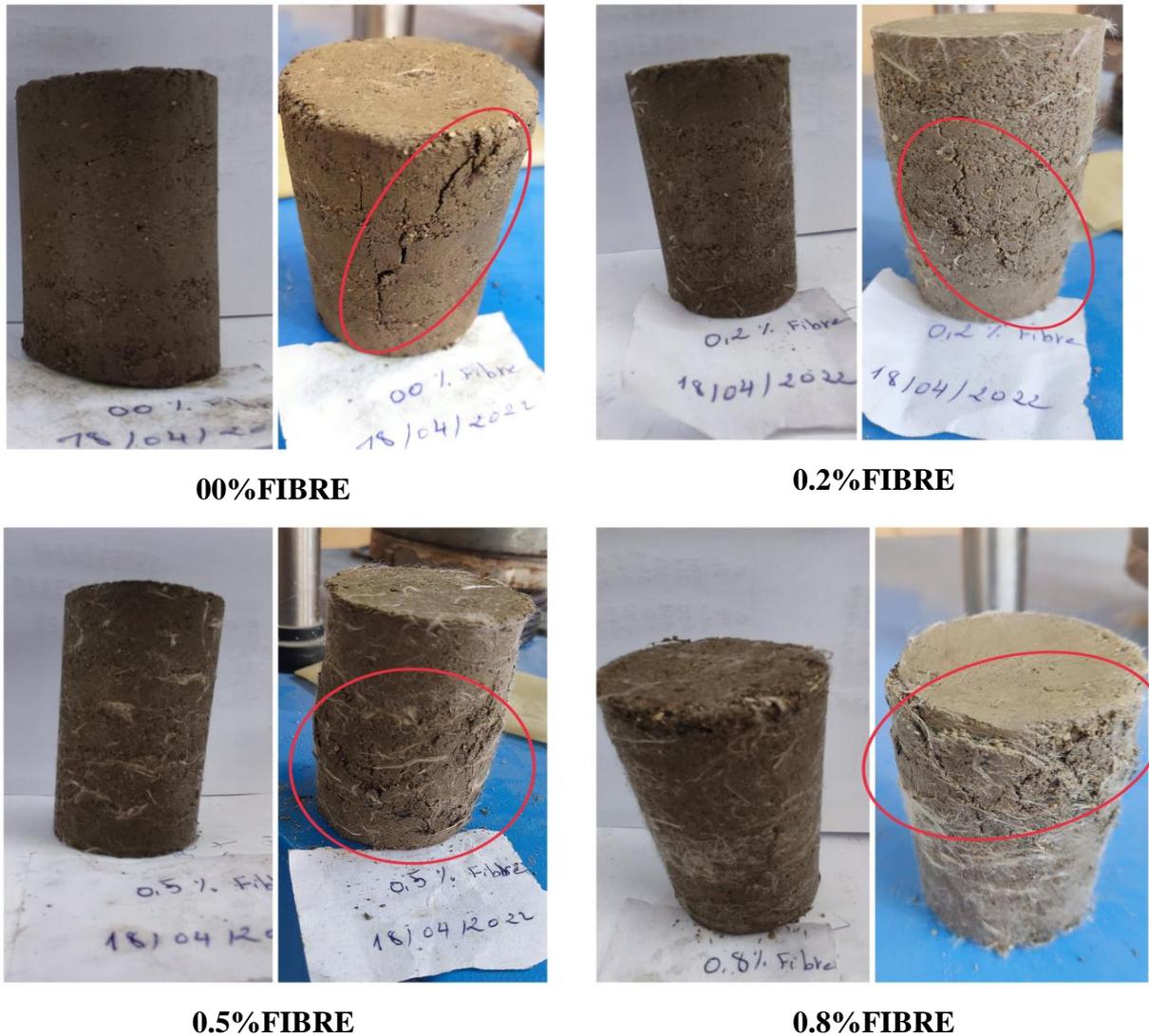


Fig IV.14 : plan de rupture (allure des éprouvettes) après écrasement d'essai UCS après 7 jours.

Dans la Figure IV.14 présentent le plan de rupture avant et après écrasement d'essai UCS pour 7 jours avec différent pourcentage de fibre 0 et 0,2 et 0,5 à 0,8 %.

Dans la première expérience du sable cimenté non renforcé on remarque une grande fissuration verticale au niveau d'éprouvette avec une grande déformation lors de l'ajout de 0,2% de fibre on remarque que cette fissure est moyenne par rapport à la déformation du sable cimenté non renforcé lors de l'ajout de 0,5% de fibre on remarque une diminution significative au niveau de fissuration et de la vitesse de déformation lors de l'ajout de 0,8% de fibre on remarque diminution au niveau de fissuration et de la vitesse de déformation .

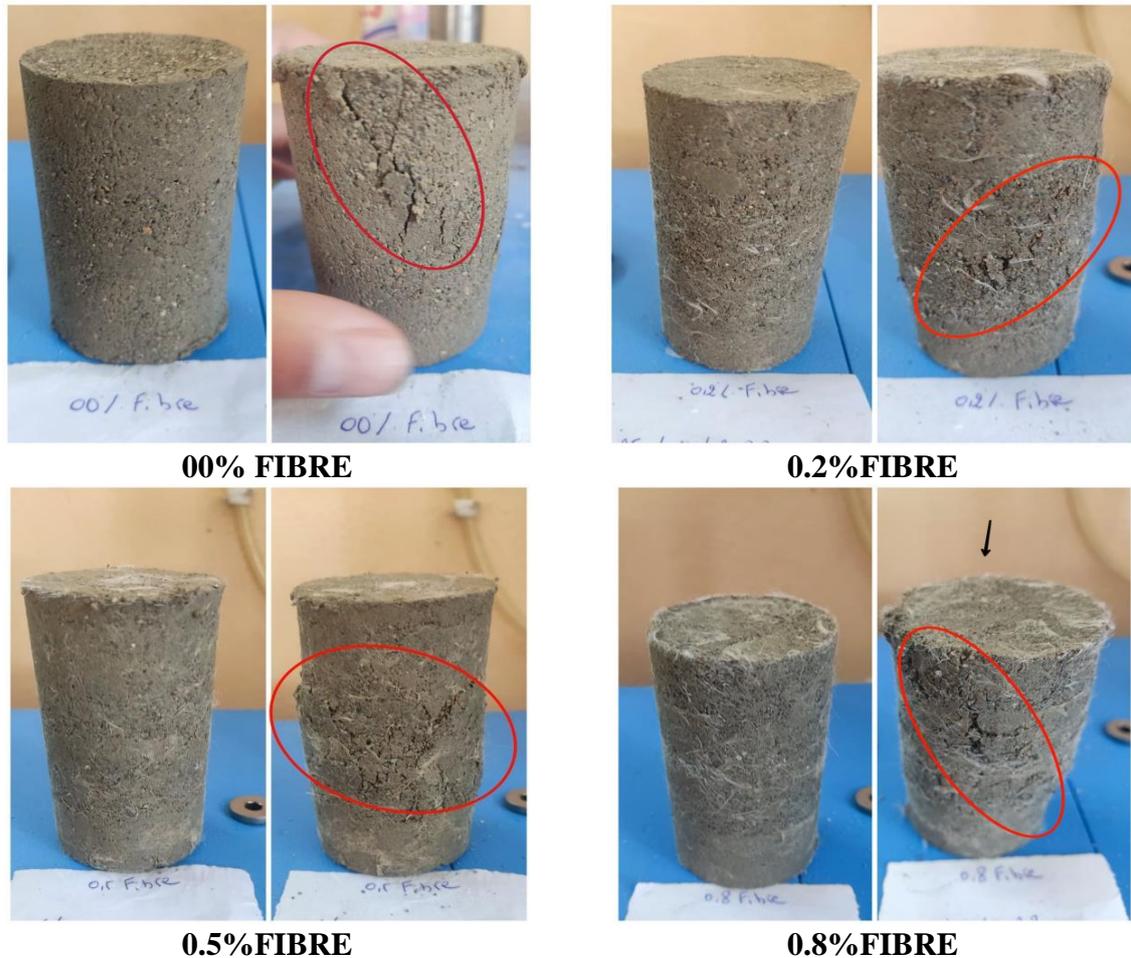


Fig IV.15 : Plan de rupture après écrasement d'essai UCS après 14 jours.

Dans la Figure IV.15 présentent plan de rupture avant et après écrasement d'essai UCS pour 14 jours avec différent pourcentage de fibre 0 et 0,2et 0,5 à 0,8 %.

Dans la première expérience du sable cimenté non renforcé après 14j on remarque une grande fissuration verticale au niveau d'éprouvette avec une grande déformation la fissuration et la déformations diminuent quand on ajoute de 0,2% de fibre on remarque que cette fissure est moyenne par rapport à la déformation du sable cimenté non renforcé lors de l'ajout de 0,5% de fibre on remarque une diminution notable au niveau de fissuration et de la vitesse de déformation lors de l'ajout de 0,8% de fibre on remarque diminution au niveau de fissuration et de la vitesse de déformation .

D'après les figures IV.14 et IV.15 on observe que l'influence de fibre et l'effet du temps joue un rôle important pour d'augmenter la résistance des éprouvettes du sable cimenté et de minimiser ainsi la fissuration et la vitesse de déformation.

IV.6 Conclusion :

Ce travail présente une étude en laboratoire de l'influence de l'ajout des fibres polypropylène. L'utilisation de fibre de polypropylène combinée à un taux de ciment 5% a permis d'obtenir de l'influence de la teneur en fibre dans les caractéristiques mécaniques comme la densité sèche, CBR et UCS en diminuant ces valeurs.

Les résultats obtenus montrent que l'ajout des fibres et du ciment au sol affecte les différentes propriétés géotechniques du sol étudié. L'existence des fibres dans le sol permet de prendre en charge une partie du chargement appliqué, conséquemment d'améliorer la résistance du sol. L'inclusion de fibre polypropylène de 0%, 0.2%, 0.5% et 0.8% a augmenté la résistance du sable. L'influence de la fibre ajoutée aux mélanges est significativement négative sur la plupart des mélanges, ce qui, environ la même densité sèche pour les mélanges.

L'ajout de fibre de polypropylène en pourcentage améliore les caractéristiques mécaniques du sable.

Conclusion générale :

Conclusion générale :

Conclusion générale :

Cette mémoire s'inscrit dans l'objectif d'abord d'étudier, puis à terme de remédier à ces de renforcement apparus dans les d'oueds de la région de Chlef (sables de Chlef), en étudiant les comportements mécaniques de sables précités. Cette étude expérimentale a été effectuée en collaboration de deux différents laboratoires : Laboratoire géotechnique de l'université de Khemis Miliana et laboratoire de MAPA Djendel wilaya de aindefla. Les essais Proctor, essai CBR et essai (UCS) ont été réalisés. Le comportement de sable a été analysé suite à des ajouts d'un taux variable de pourcentage de fibre de polypropylène, variant de 0% à 0,2%, 0,5%, 0,8% ainsi de résidus de ciment à un taux fixe du ciment de 5%. Les différents résultats obtenus, ont mis en lumière les principaux points suivants repris dans les paragraphes suivants.

Pour l'essai Proctor l'influence de fibre ajoutée aux mélanges est significativement négative sur la plupart des mélanges ce qui, Environ la même Wopt% les mélanges varie entre 12% et 13%.

Pour l'essai CBR l'influence de fibre ajoutée aux mélanges donnée portance de sable de chlef élevée. CBR 00 % de (PP) à l'Etat Immédiat donne un indice portance égale 12,76% lors de l'ajout de 0,2% de fibre la portance du sable augmente à 17,23 % lors de l'ajout de 0,5% de fibre la portance du sable augmente à 19,02 % % lors de l'ajout de 0,8 % de fibre la portance du sable augmente à 21,11 % donc la portance du sable de shlef élevée.

Le traitement du sable avec 0% à 0,2%, 0,5%, 0,8% de (PP) et 5% de ciment plastic mélanges avec OPT + 12%. Caractéristiques comme résistance maximal, UCS du sol. Pour 7 jours la valeur UCS du sol naturel ne dépasse pas 949,071618 kpa comme valeur maximale lors de l'ajout de 0,2% de fibre la résistance du sable augmente à 1114,58886 kpa lors de l'ajout de 0,5% de fibre la résistance du sable augmente à 1710,87533 kpa et lors de l'ajout de 0,8 % de fibre la résistance du sable diminue à 1144,29708 kpa .

Pour 7 jours la valeur UCS du sol naturel ne dépasse pas 1188,32891 kpa comme valeur maximale lors de l'ajout de 0,2% de fibre la résistance du sable augmente à 1190,98143 kpa lors de l'ajout de 0,5% de fibre la résistance de la sable augmente à 1336,33952 kpa lors de l'ajout de 0,8 % de fibre la résistance du sable augmente à 1388,32891 kpa.

Perspectives

Les méthodes des éléments finis, différences finis et éléments discrets devraient être mises au point pour intégrer un modèle constitutif afin de décrire le comportement des sables renforcés par fibres. Certains paramètres requis pour établir le modèle nécessitent une meilleure compréhension des mécanismes en jeu et plus des recherches expérimentales sont donc nécessaires.

Recommandations

Des recherches plus approfondies sont nécessaires pour parvenir à une compréhension plus profonde du comportement des sables renforcés de fibres. D'autres développements théoriques devraient aussi caractériser et prédire le comportement des sols renforcé par des fibres afin de se rapprocher de solutions plus fiables sur la réduction du risque pour les constructions sur des sols potentiellement liquéfiables, par exemple pour les constructions et les infrastructures routières implantées à proximité des berges des oueds.

Le mode opératoire suivi a été élaboré d'après des recommandations de différents chercheurs, il permet de confectionner des échantillons homogènes et de réaliser des essais de bonne qualité. Enfin, des tests de répétabilité ont été réalisés afin de mieux appréhender la fiabilité de notre appareillage mis à notre disposition pour la suite de nos essais.

Références Bibliographie

- Ahmed, a., belkhatir, m., sadek, m., & shahrour, i. Techniques d'amélioration des sols dans les zones sismiques.
- Amir hamidi, mahdi hooresfand 2013
- Aouali nawel 2020 these de doctora etude en laboratoire de la contribution des tgeotextiles al'amélioration de la resistance des sols limoneux (experimentation et modelisation)
- Arab ahmed, m.belkhatir1, marwan sadek2, i.shahrour: techniques d'amélioration des sol
- Bazazorde, s. M. (2018), ucs and cbr behaviour of perth sandy soil reinforced with waste tyre fibres and cement
- Benessalah i. Et al (2015): "laboratory study on shear strength behaviour of reinforced sandy soil: effect of glass-fibre content and other parameters".arab journal sci. Eng. Vol. 41 , pp. 1343–1353.
- Benessalah i., (2017) : "comportement des interfaces geosynthetiques sous chargement dynamique due a l'impact". These de doctorat, universite de chlef, algerie.
- Bouassida.m: technique d'amélioration des sols, p enit, 2008.
- Brown, c. B., and sheu, m. S., (1975), "effects of deforestation on slopes", journal of
- Chaa khalissa etude de l'effet des fibres de polypropylene sur les caracteristiques de deformabilite d'une argile stabilisee2020
- Chaa, k. (2020). Etude de l'effet des fibres de polypropylene sur les caracteristiques de deformabilite d'une argile stabilisee (these de doctorat, univ m'sila).
- Chawki, m. A. H. D. I. (2019). Etude de l'effet des fibres de polypropylene sur les proprietes geotechniques d'une argile stabilisee (doctoral dissertation,

universite mohamed bou diaf-m'sila).

- Chemmam mohammed: etude en laboratoire du comportement des sols a la liquefaction
- Consoli, n. C., casagrande, m. D. T., and coop, m. R., (2007), "performance of a fibre"
- Consoli, n. C., vendruscolo, m. A., fonini, a., and dalla rosa, f., (2009), "fiber"
- Cours : dr. Gadouri hamid amelioration des caracteristiques des sols
- Dhouib a., liausu p. (2005). Le compactage des sols, actes du seminaire international de tunisie du 25 et 26 mars 2005.
- Diambra, a., ibraim, e., wood, d. M., and russell, a. R., (2010), "fibre reinforced sands: experiments and modeling", geotextiles and geomembranes
- Etude en laboratoire du comportement mecanique des sols granulaires renforces

Geomembranes

Geotechnical and geoenvironmental engineering

- Giroud, j.p. and noiray.l: getextile, reinforced unpaved road design. Journal of the
- Gray, h., al-refeai, t., (1986), "behavior of fabric versus fiber reinforced sand", j geotech eng asce
- Gregory, h., chill, s., (1998), "stabilization of earth slope with fiber reinforcement", in: 6th int conf geosynt, atlanta, usa.
- Hedadcha abdennour. Gaouaoui salim influence de la teneur en eau sur les caracteristiques mecaniques et physique de la couche de fondation d'une chaussee stabilisee par les dechets de ceramique et le ciment.2021
- Hoover, j. M., moeller, d. T., pitt, j. M., smith, s. G., wainaina, n. W., (1982),
- Khababa anes abderrahmene ,benchenaf mohammed influence de la teneur en eau sur les proprietes mecaniques et physiques de la couche de fondation d'une chaussee stabilisee par les dechets de plastique

industriels et du ciment 2021

- Khababa anes abderrahmene benchenaf mohammed influence de la teneur en eau sur les proprietes mecaniques et physiques de la couche de fondation d'une chaussee stabilisee par les dechets de plastique industriels et du ciment 2021
- Khiatine, m. (2011). Renforcement des sols de fondation par des colonnes ballastees. Application a la fondation d'un silo de 80000 tonnes (doctoral dissertation, alger).
- Leyla bouaricha these comportement des sols renforces par fibres synthetiques: influence de quelques parametres physiques.2018
- Mahdi chawki etude de l'effet des fibres de polypropylene sur les proprietes geotechniques d'une argile stabilisee 2019
- Maher, h., gray, h., (1990), "static response of sand reinforced with randomly distributed fibers", j geotech eng asce
- Mokhtar, m. A., & moussab, h. A. S. S. A. N. I. (2018). Comportement mecanique des sols granulaires ameliores par les fibres de polypropylene (sables de la region de chlllef).
- Park, t., tan, s. A., (2005), "enhanced performance of reinforced soil walls by the inclusion of short fiber", geotext geomembr
- Rahai amel et boussalem madiha renforcement des sols par ajout des fibres naturelles 2018

reinforced sand at large shear strains", geotechnique,

Reinforcement effects on sand considering a wide cementation range", geotextiles and

- Rifai, s., (2000), "impact of polypropylene fibers on desiccation cracking and hydraulic conductivity of compacted clay soils", ph.d. dissertation, wayne state university.
- Santoni, l., webster, l., (2001), "airfields and road construction using fiber

stabilization of sands”, j trans eng asce; 127, 96–104.

- Seyed m. A. Bazazorde ucs and cbr behaviour of perth sandy soil reinforced with waste tyre fibres and cement 2018
- Sumer, b.m., fredse, j., christensen, s. And lind, m.t: sinking/floatation of pipelines
- Tang, c. S., shi, b., and zhao, l. Z., (2010), “interfacial shear strength of fiber reinforced soil”, geotextiles and geomembranes
- Waldron, l. J., (1977), “the shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil”, proc soil sci soc am
- Zhang, c., zhu, h., shi, b., wu, f., and yin, j. (2014). Experimental investigation of pulloutbehaviour of fibre-reinforced polymer reinforcements in sand. American society ofcivilengineers journal

Références Web graphie

www.keller-france.com

<http://www.btp-cours.com>

<http://www.theses.fr/>

<http://upchaux.fr/>

www.keller-france.com

www.preventionbtp.fr

ANNEX

Caractéristiques du compactage I essai Proctor

Tableau: Caractéristique de compactage du sable de chlef

ESSAI	N1	N2	N3	N4	N5
Poids de l'eau ajoutée %	10	12	14	16	18
<i>Teneur en eau</i>	9.19	10.71	12.55	14.21	15.46
<i>Densité sèche</i>	1.700	1.786	1.797	1.751	1.686
<i>défférence</i>	0.81	1.29	1.45	1.79	2.54

W _{opn} (%)	12,175
γ _{opn} (t/m ³)	1,801

W _{opn corrigé} (%)	12,2
γ _{opn corrigé} (t/m ³)	1,801

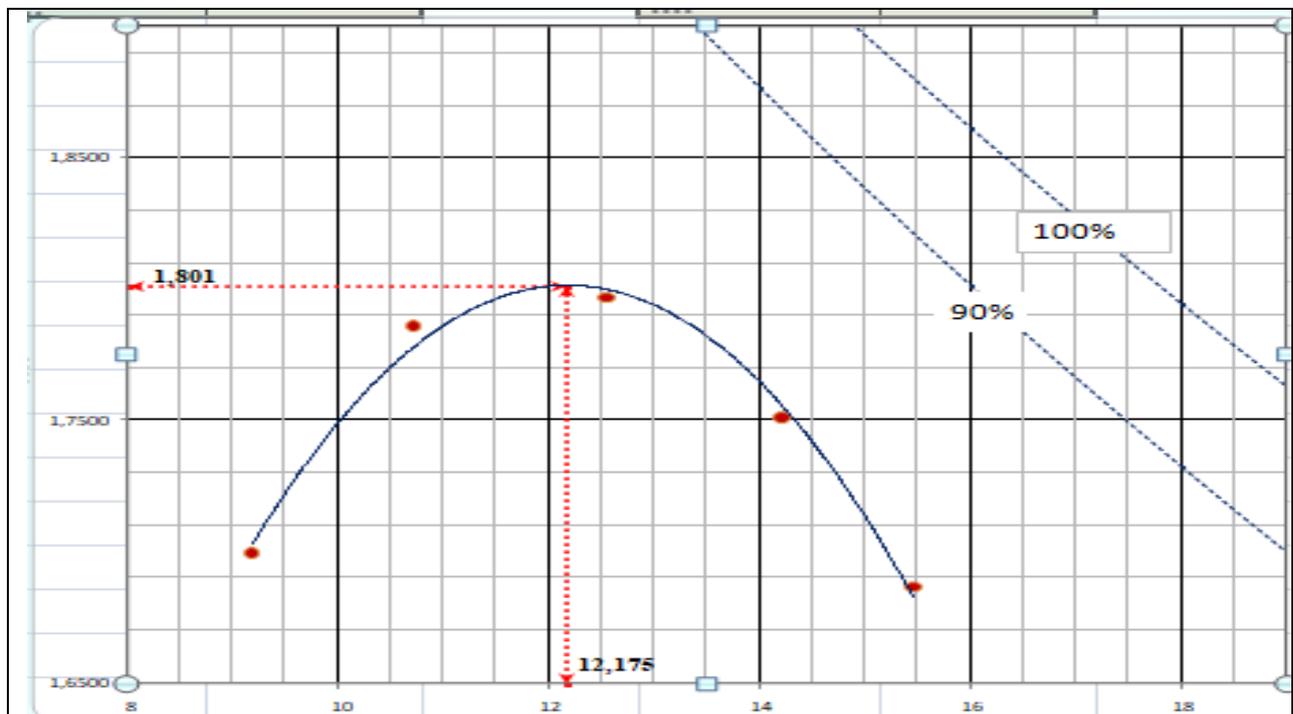


Fig.. Influence de teneur en eau dans le compactage de sol avec 0 % PP

Tableau Caractéristique de compactage du sable de chlef (0.2 % fibre)

Essai	N1	N2	N3	N4
Poids de l'eau ajoutée %	10	12	14	16
<i>Teneur en eau</i>	10,51	11,69	13,76	14,24
<i>Densité sèche</i>	1,850	1,880	1,870	1,810
<i>défference</i>	-0,51	0,31	0,24	1,76

Wopn (%)	12.189
γ_{opn} (t/m ³)	1.894

Wopn corrigé (%)	12.2
γ_{opn} corrigé (t/m ³)	1.894

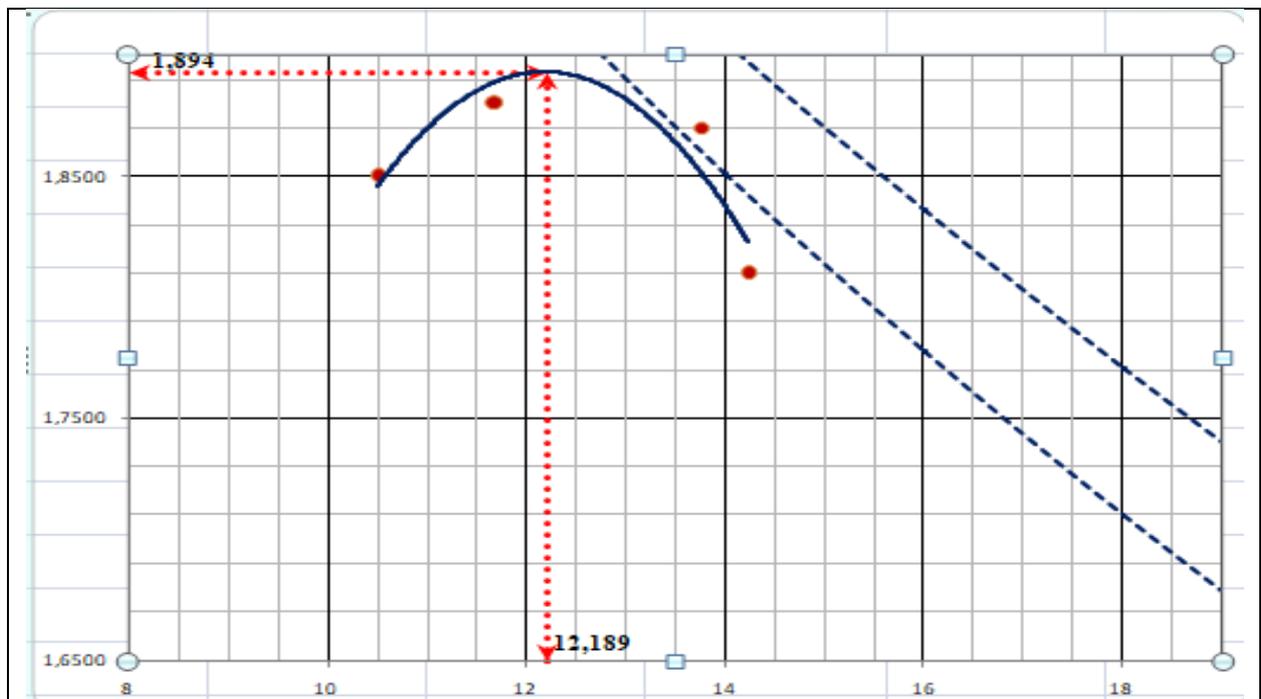


Fig.. Influence de teneur en eau dans le compactage de sol avec 0,2 % PP

Tableau .Caractéristique de compactage du sable de chlef (0.8 % fibre)

ESSAI	N1	N2	N3	N4	N5
Poids de l'eau ajoutée %	10	12	14	16	18
<i>Teneur en eau</i>	10,96	12,08	13,37	13,98	15,99
<i>Densité sèche</i>	1,820	1,850	1,870	1,860	1,760
<i>défference</i>	-0,96	-0,08	0,63	2,02	2,01

Wopn (%)	13,0
γ_{opn} (t/m ³)	1,869

Wopn corrigé (%)	13,0
γ_{opn} corrigé (t/m ³)	1,869

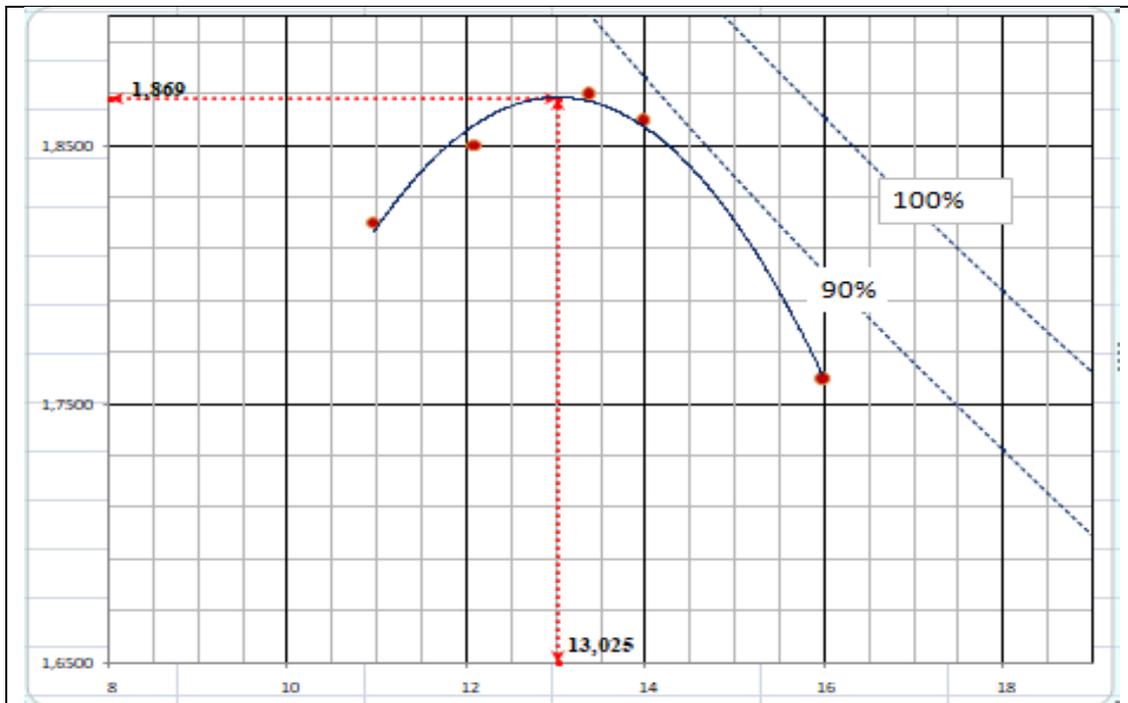


Fig. . Influence de teneur en eau dans le compactage de sol avec 0,8 % PP

Résultats des l'essai CBR Immédiat avec (0% .0.2% .0.5% .0.8%) de fibre

Tableau présente les résultats de l'essai CBR immédiat (0% fibre)

Enfoncement (mm)	Force totale (kgf)			Pression (Kgf/cm2)
	Temps	Lecture	Valeur	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,625	0' 30"	17	39,95	0,9
1,25	1' 00"	35	82,25	1,8
2	1' 40"	65	152,75	3,3
2,5	2' 00"	85	199,75	4,3
5	4' 00"	263	618,05	13,4
7,5	6' 00"	523	1229,05	26,6
10	8' 00"	823	1934,05	41,9
12,5	10' 00"	1130	2655,5	57,6

à 2,5 (mm)P(2,5)/0,70	6,19
à 5 (mm)P(5)/1,05	12,76
Indice CBR =	12,76

Tableau présente les résultats de l'essai CBR immédiat (0.2% fibre)

Enfoncement (mm)	Force totale (kgf)			Pression (Kgf/cm2)
	Temps	Lecture	Valeur	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,625	0' 30"	17	39,95	0,9
1,25	1' 00"	41	96,35	2,1
2	1' 40"	86	202,1	4,4
2,5	2' 00"	115	270,25	5,9
5	4' 00"	355	834,25	18,1
7,5	6' 00"	700	1645	35,7
10	8' 00"	1097	2577,95	55,9
12,5	10' 00"	1499	3522,65	76,4

à 2,5 (mm)P(2,5)/0,70	8,37
à 5 (mm)P(5)/1,05	17,23
Indice CBR =	17,23

Tableau présente les résultats de l'essai CBR immédiat (0.5% fibre)

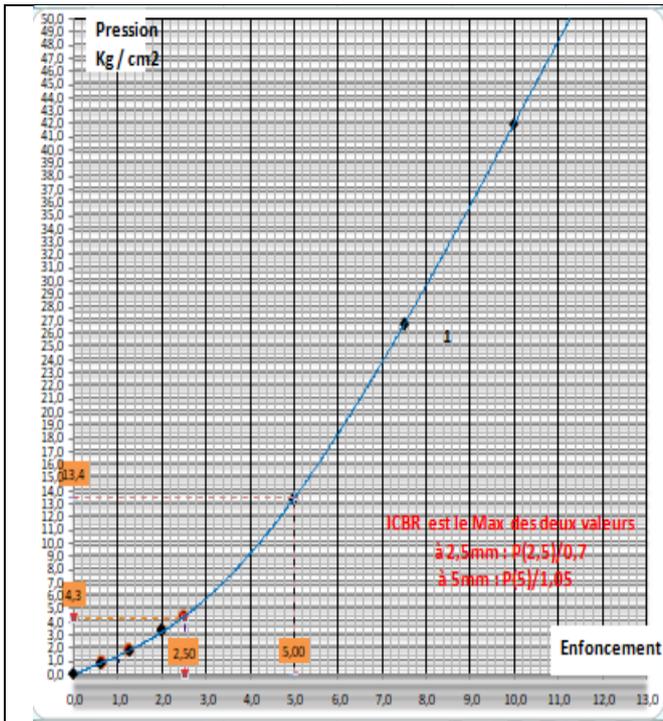
Enfoncement (mm)	Force totale (kgf)			Pression (Kgf/cm2)
	Temps	Lecture	Valeur	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,625	0' 30"	11	25,85	0,6
1,25	1' 00"	29	68,15	1,5
2	1' 40"	66	155,1	3,4
2,5	2' 00"	93	218,55	4,7
5	4' 00"	392	921,2	20,0
7,5	6' 00"	894	2100,9	45,6
10	8' 00"	1498	3520,3	76,3
12,5	10' 00"	2137	5021,95	108,9

à 2,5 (mm)P(2,5)/0,70	6,77
à 5 (mm)P(5)/1,05	19,02
Indice CBR =	19,02

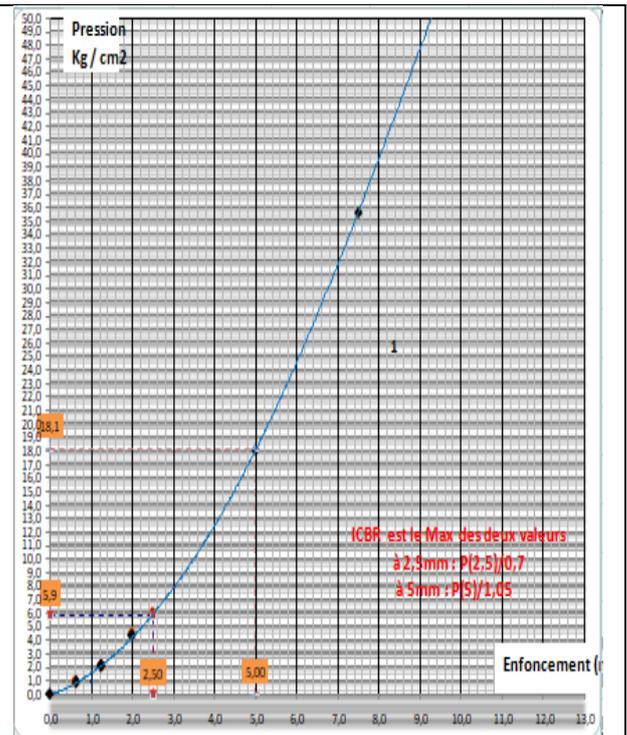
Tableau présente les résultats de l'essai CBR immédiat (0.8% fibre)

Enfoncement (mm)	Force totale (kgf)			Pression (Kgf/cm2)
	Temps	Lecture	Valeur	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,625	0' 30"	21	49,35	1,1
1,25	1' 00"	49	115,15	2,5
2	1' 40"	99	232,65	5,0
2,5	2' 00"	131	307,85	6,7
5	4' 00"	435	1022,25	22,2
7,5	6' 00"	861	2023,35	43,9
10	8' 00"	1358	3191,3	69,2
12,5	10' 00"	1882	4422,7	95,9

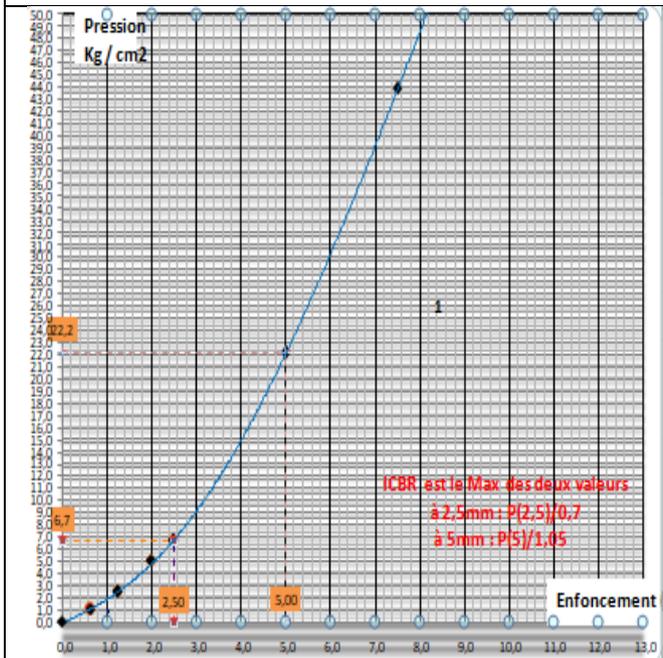
à 2,5 (mm)P(2,5)/0,70	9,54
à 5 (mm)P(5)/1,05	21,11
Indice CBR =	21,11



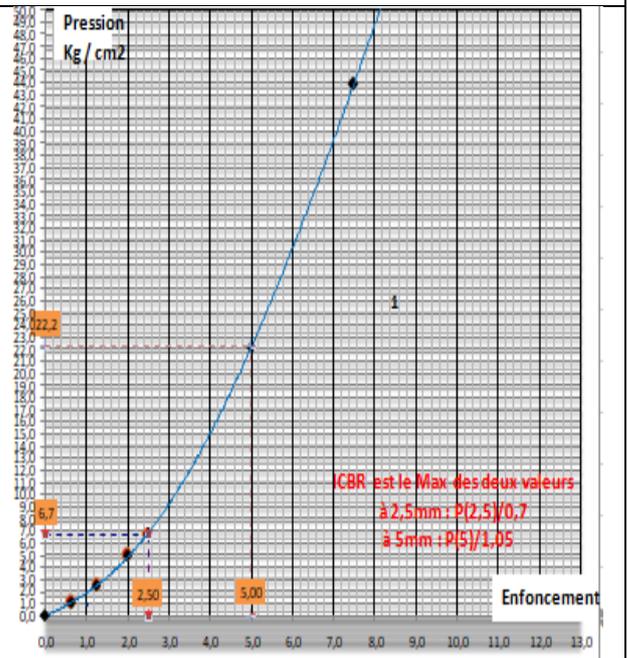
Courbe ICBR du sable (0% fibre) . ICBR 12.76



Courbe ICBR du sable (0% fibre) ICBR 17.23



Courbe ICBR du sable (0% fibre) ICBR 19.02



Courbe ICBR du sable (0% fibre) ICBR 21.11

Fig. Courbe indice CBR sur différent teneur en fibre (0% .0.2% .0.5% .0.8%)

Tableau IV.8. Résultats des essais Proctor et CBR. wopt (%) : Teneur en eau optimale.

Mélange	wopt (%) Proctor	wopt (%) compactage	Indice CBR
Sable + 0% de fibre	10	8,84	12.76
Sable + 0.2% de fibre	10	9,10	17.23
Sable + 0.5% de fibre	11	9,48	19.02
Sable +0.8% de fibre	11	10,97	21.11

Les résultats affichés sur l'appareil UCS (KN)

Tableau IV.10 Effet de l'ajout de PP et ciment dans le sable (7J).

%fibre	00	0,2	0,5	0,8
Déformation (mm)	Force(KN)	Force(KN)	Force(KN)	Force(KN)
0	0	0	0	0
0,25	0,644	0,76	0,32	0,64
0,5	1,352	1,3	0,83	0,885
0,75	1,662	1,668	1,65	1,09
1	1,776	1,9	2,23	1,307
1,25	1,789	2,058	2,69	1,476
1,5	1,643	2,101	2,97	1,626
1,75	1,452	2,069	3,089	1,753
2		2,044	3,131	1,878
2,25		1,92	3,201	1,968
2,5		1,878	3,225	2,05
2,75		1,78	3,168	2,099
3		1,646	3,156	2,137
3,25			3,113	2,152
3,5			3,055	2,157
3,75			3,001	2,145
4			2,902	2,133
4,25			2,874	2,123
4,5			2,817	2,086
4,75			2,75	2,02
5			2,683	1,989
5,25			2,61	1,928
5,5			2,558	1,881
5,75			2,448	1,82
6			2,43	1,785
6,25				1,726
6,5				1,667

Les résultats UCS (KPA)

Tableau IV.11 Effet de l'ajout de PP et ciment dans le sable (7J).

force (kpa) 00% fibre	force (kpa) 0,2% fibre	force (kpa) 0,5% fibre	force (kpa) 0,8% fibre	déformation $\Delta L \setminus L$	déformation % $\Delta L \%$
0	0	0	0	0	0
341,644562	403,183024	328,912467	339,522546	0,00255102	0,25510204
717,241379	689,655172	531,564987	469,496021	0,00510204	0,51020408
881,697613	884,880637	875,331565	578,249337	0,00765306	0,76530612
942,175066	1007,95756	1183,02387	693,3687	0,01020408	1,02040816
949,071618	1091,77719	1427,0557	783,023873	0,0127551	1,2755102
871,618037	1114,58886	1575,59682	862,599469	0,01530612	1,53061224
770,291777	1097,61273	1638,72679	929,973475	0,01785714	1,78571429
0	1084,35013	1661,00796	996,286472	0,02040816	2,04081633
0	1018,56764	1698,14324	1044,03183	0,02295918	2,29591837
0	996,286472	1710,87533	1087,53316	0,0255102	2,55102041
0	944,297082	1680,6366	1113,52785	0,02806122	2,80612245
0	873,209549	1674,27056	1133,687	0,03061224	3,06122449
0	0	1651,45889	1141,64456	0,03316327	3,31632653
0	0	1620,68966	1144,29708	0,03571429	3,57142857
0	0	1592,04244	1137,93103	0,03826531	3,82653061
0	0	1539,52255	1131,56499	0,04081633	4,08163265
0	0	1524,66844	1126,25995	0,04336735	4,33673469
0	0	1494,42971	1106,6313	0,04591837	4,59183673
0	0	1458,88594	1071,61804	0,04846939	4,84693878
0	0	1423,34218	1055,17241	0,05102041	5,10204082
0	0	1384,61538	1022,81167	0,05357143	5,35714286
0	0	1357,02918	997,877984	0,05612245	5,6122449
0	0	1298,67374	965,517241	0,05867347	5,86734694
0	0	1289,12467	946,949602	0,06122449	6,12244898
0	0	0	915,649867	0,06377551	6,37755102
0	0	0	884,350133	0,06632653	6,63265306

2^{eme} essai (pour 14jouis)

Les résultats affichés sur l'appareil UCS (KN)

Tableau IV.16 Effet de l'ajout de PT et ciment dans le sable(14J).

%fibre	00	0,2	0,5	0,8
Déformation (mm)	Force(KN)	Force(KN)	Force(KN)	Force(KN)
0	0	0	0	0
0,25	1,14	0,78	0,374	0,429
0,5	1,89	1,638	1,11	0,843
0,75	2,19	2,084	1,594	1,212
1	2,24	2,195	2,015	1,542
1,25	2,175	2,245	2,268	1,776
1,5	1,74	2,213	2,42	2,099
1,75		2,143	2,49	2,205
2		2,069	2,519	2,317
2,25		1,964	2,497	2,451
2,5		1,87	2,425	2,536
2,75		1,64	2,363	2,57
3			2,277	2,602
3,25			2,204	2,617
3,5			2,101	2,616
3,75			2,005	2,587
4			1,922	2,581
4,25				2,56
4,5				2,524
4,75				2,494
5				2,434
5,25				2,38
5,5				2,3
5,75				2,225
6				2,123
6,25				2,03

Les résultats UCS en (KPA)

Tableau IV.17 Effet de l'ajout de PT et ciment dans le sable(14J).

force (kpa) 00% fibre	force (kpa) 0,2% fibre	force (kpa) 0,5% fibre	force (kpa) 0,8% fibre	déformation $\Delta L \setminus L$	déformation % $\Delta L \%$
0	0	0	0	0	0
604,774536	413,793103	305,570292	227,586207	0,00255102	0,25510204
1002,65252	868,965517	588,859416	447,214854	0,00510204	0,51020408
1161,80371	1105,57029	845,623342	642,970822	0,00765306	0,76530612
1188,32891	1164,45623	1068,96552	818,037135	0,01020408	1,02040816
1153,84615	1190,98143	1203,18302	995,225464	0,0127551	1,2755102
923,076923	1174,00531	1283,81963	1113,52785	0,01530612	1,53061224
0	1136,87003	1320,95491	1169,76127	0,01785714	1,78571429
0	1097,61273	1336,33952	1229,17772	0,02040816	2,04081633
0	1041,90981	1324,66844	1300,26525	0,02295918	2,29591837
0	992,04244	1286,47215	1345,35809	0,0255102	2,55102041
0	870,026525	1253,5809	1363,39523	0,02806122	2,80612245
0	0	1207,95756	1380,37135	0,03061224	3,06122449
0	0	1169,23077	1388,32891	0,03316327	3,31632653
0	0	1114,58886	1387,79841	0,03571429	3,57142857
0	0	1063,66048	1372,41379	0,03826531	3,82653061
0	0	1019,62865	1369,23077	0,04081633	4,08163265
0	0	0	1358,09019	0,04336735	4,33673469
0	0	0	1338,99204	0,04591837	4,59183673
0	0	0	1323,07692	0,04846939	4,84693878
0	0	0	1291,24668	0,05102041	5,10204082
0	0	0	1262,59947	0,05357143	5,35714286
0	0	0	1220,15915	0,05612245	5,6122449
0	0	0	1180,37135	0,05867347	5,86734694
0	0	0	1126,25995	0,06122449	6,12244898
0	0	0	1076,92308	0,06377551	6,37755102

Quelques photos des essais

Caractéristiques du compactage | essai Proctor





Résultats des l'essai CBR Immédiat avec (0% .0.2% .0.5% .0.8%) de fibre





Essai UCS













Caractéristique du sable

Essai pycnomètre :



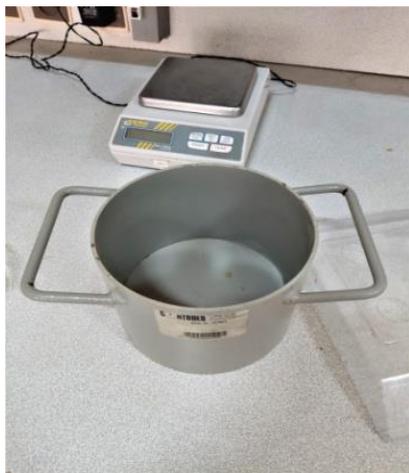
Tableau IV.4: Résultats obtenus lors d'un essai pycnomètre.

N d'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
pycno vide [Q₁ (g)]	48,7	48,7	48,7
Pycno+sable [Q₂ (g)]	68,6	68,7	68,7
Pycno+sable+eau [Q₃ (gr)]	160,4	160,2	160,5
Pycno+eau [Q₄ (g)]	147,9	147,9	147,9
γ_s (g.cm⁻³)	2,689	2,597	2,702

Calcule e_{\min} et e_{\max} :



(a)- Une dame en bois



(b)-Moule



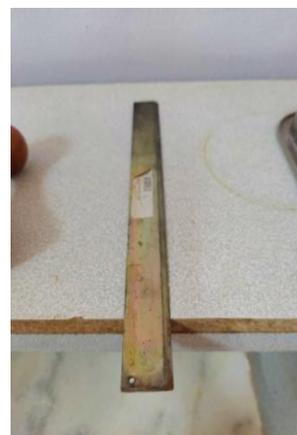
(c) Entonnoir



(d) Une balance



(e) Une pelle



(f) Une règle





Essai granulométrique du sable





Tableau : Résultats de l'essai granulométrique.

Courbe granulométrique du sable

Nature du matériau:.....Sol Déblai mis en stock.....
 Date de prélèvement:.....
 Date d'essai :.....
 Masse de l'échantillon sec totale M₀ 614 gr
 Masse tamisé dans (10 mm) M₁ 0,0 gr
 Masse après lavage(>80µm) M₁ gr
 Masse des fines (<80µm)= gr

Dmax	D60	D30	D10	Cu	Cc
2,0	0,747	0,414	0,216	3,45E+00	1,1E+00

Tamis maille (mm)	Masse des Refus Cumulés	Pourcentage des RefusCumulés	Pourcentage tamisat (%)
200	0	0,00	100,00
125	0	0,00	100,00
100	0	0,00	100,00
80	0,0	0,00	100,00
63,0	0	0,00	100,00
50,0	0	0,00	100,00
31,5	0	0,00	100,00
20,0	0	0,00	100,00
10,0	0	0,00	100,00
2,5	0	0,00	100,00
2,0	0,4	0,07	99,93
1,0	105,27	17,14	82,86
0,4	437,77	71,30	28,70
0,20	562,79	91,66	8,34
0,1	604,25	98,41	1,59
0,08	611,83	99,65	0,35

