

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N° :



DOMAINE : TECHNOLOGIE
FILIERE : GENIE CIVIL
OPTION : GEOTECHNIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: MAHDI Chawki

Intitulé

Étude de l'effet des fibres de polypropylène sur
les propriétés géotechniques d'une argile
stabilisée

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. SEDDIKI Ahmed	Université de M'Sila	Président
Dr. MEDDAH Abdelaziz	Université de M'Sila	Rapporteur
Dr. MHAMEDDI Abdelkrim	Université de M'Sila	Examineur
Dr. BELOUAHRI Brahim	Université de M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, remercions Dieu Tout-Puissant, de nous avoir donné de la force & de la patience, ainsi que du courage pour surmonter toutes les difficultés.

Et n'oublier pas mes parents & ma famille qui apportent tout le soutien nécessaire dans mon parcours scolaire.

Je remercie bien mon encadreur Dr. MEDDAH Abdelaziz, Qui m'a dirigé à réaliser ce travail modeste & le soutien scientifique et moral qu'il a apporté à moi, ce qui a donné lieu à qui était dans le laboratoire de génie civil de la Faculté de Technologie de l'Université de Mohamed Boudiaf –M'SILA-Sous la supervision de Mme BOUREZEG Hanane & BAKHTI Yamena.

J'exprime mon gratitude au Pr. KHEMISSA Mohamed, Dr. SEDDIKI Ahmed et Dr. MEKKI Lakhdar pour leur aide

J'exprime mon gratitude aux responsables du laboratoire B.ER.M et du Laboratoire L.C.T.P de la Wilaya de M'Sila, surtout M. DEGHEFEL Moussa.

Nous remercions les membres du jury Dr. MHAMEDI Abdelkrim et DR. BELOUAHRI Brahim pour avoir accepté de participer à l'évaluation de notre travail.

DEDICACES

*Au nom du dieu le clément et le miséricordieux louange ALLAH le tout
puissant.*

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance & de
remerciement*

A mes chers parents

A mes chers frères

*A mes chères sœurs Et L'enfant gâté (Mohamed) et toute la famille Mahdi
& Pour tous mes amis*

*A mon tous Qui m'ont aidé de près et de loin Surtout (Rania, Khadija et
Nadjet)*

*A mon Tous les enseignants de la filière pédagogique notamment en génie
civil*

*Et à tous ceux qui l'ont connu au cours de mon carrière
Scolaire.*

Liste des notations utilisées

Ic : Indice de consistance

H : Hauteur

IP : Indice de plasticité.

M : Masse

S.S.T : Surface spécifique totale.

VBS : Valeur du bleu de méthylène.

ω_{nat} : Teneur en eau naturelle.

ω_L : Limite de liquidité.

ω_P : Limite de plasticité.

γ_d : poids volumique sec.

γ_h : poids volumique humide.

Sr : degré de saturation.

ω_{opt} : La teneur en eau optimum.

Ac : Activité de la fraction argileuse.

Atp : Argiles très plastiques.

C.B.R: Californian Bearing Ratio.

ρ_d : La masse volumique sèche.

ρ_h : La masse volumique humide

Liste des tableaux

- ✓ Tableau.II.1. Les caractéristiques mécaniques et physiques des fibres polypropylène
- ✓ Tableau.III.1. Analyse chimique du sol
- ✓ Tableau.III.2. Analyse granulométrique par tamisage
- ✓ Tableau.III.3. Analyse granulométrique par sédimentométrie
- ✓ Tableau.III.4. Les masses volumiques du sol
- ✓ Tableau.III.5. Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg
- ✓ Tableau.III.6. Valeurs au bleu de méthylène par l'essai à la tâche
- ✓ Tableau.III.7. Caractéristiques d'identification du sol
- ✓ Tableau.III.8. Pourcentage des éléments chimiques du ciment
- ✓ Tableau.III.8. Pourcentage des éléments chimiques du ciment
- ✓ Tableau.III.10. Codage d'essais.
- ✓ Tableau IV.1. Résultats de l'essai Proctor normal du sol naturel
- ✓ Tableau IV.2. Résultats de l'essai CBR Immédiat du sol naturel
- ✓ Tableau IV.3.Effet de fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat
- ✓ Tableau IV.4. Effet des fibres de polypropylène sur la résistance en compression
- ✓ Tableau IV.5. Effet de traitement chimique (5% Ciment) sur les caractéristiques de compactage
 - ✓ Tableau IV.6.Effet de traitement chimique (7% Ciment) sur les caractéristiques de compactage
 - ✓ Tableau IV.7.Effet de traitement chimique (9% Ciment) sur les caractéristiques de compactage
 - ✓ Tableau IV.8.Effet de ciment (5% Ciment) et des fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat
 - ✓ Tableau IV.9. Effet de ciment (7% Ciment) et des fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat
 - ✓ Tableau IV.10. Effet de ciment (9% Ciment) et des fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat
 - ✓ Tableau IV.11 : Effet des fibres de polypropylène et le ciment sur la résistance en compression.

Liste des figures

- ✓ Figure I.1. Terre armée
- ✓ Figure I.2. Renforcement des sols
- ✓ Figure I.3. Traitement des sols à la chaux
- ✓ Figure I.4. Traitement des sols au Ciment
- ✓ Figure I.5. Essai de compression
- ✓ Figure I.6. Essai Proctor
- ✓ Figure I.7. Essai CBR
- ✓ Figure I.8. Schéma de principe de l'essai de cisaillement à la boîte
- ✓ Figure I.9. Essai Triaxial
- ✓ Figure II.1. Stabilisation avec fibres
- ✓ Figure II.2. Les différents types des fibres naturelles (a-coton, b- chanvre, c- sisal, d- noix de coco)
- ✓ Figure.II.3. Les fibres de laine
- ✓ Figure II.4. Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013)
- ✓ Figure.II.5. Les différents types des fibres synthétiques (a-polyamides, b-polyesters, c- polyvinyliques, d-polyéthylène)
- ✓ Figure.II.6. Fibres de polypropylène
- ✓ Figure.III.1. Localisation du site de prélèvement
- ✓ Figure.III.2. Appareillage d'analyse granulométrique par tamisage
- ✓ Figure.III.3. Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie
- ✓ Fig.III.4. Courbe Analyse granulométrique
- ✓ Figure.III.5. Essai et matériels de limite d'Atterberg
- ✓ Figure III.6. Diagramme de Casagrande
- ✓ Figure III.7 Appareillage de l'essai bleu au méthylène
- ✓ Figure IV.1. Courbe de Proctor normal du sol naturel
- ✓ Figure IV.2. Effet des fibres de polypropylène sur le comportement du sol au poinçonnement immédiat
- ✓ Figure IV.3. Effet de fibres de polypropylène sur la résistance en compression
- ✓ Figure IV.4. Courbe Proctor normal Pour 5% de ciment
- ✓ Figure IV.5. Courbe Proctor normal Pour 7% de ciment
- ✓ Figure IV.6. Courbe Proctor normal Pour 9% de ciment
- ✓ Figure IV.7. Effet de ciment (5% Ciment) et de fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat

Liste des figures

- ✓ Figure IV.8. Effet de ciment (7% Ciment) et de fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat
- ✓ Figure IV.9. Effet de ciment (9% Ciment) et de fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat
- ✓ Figure.IV.10.Effet de ciment et des fibres de polypropylène combiné sur l'indice CBR immédiat
- ✓ Figure IV.11. Effet de fibres de polypropylène et le dosage de ciment sur la résistance en compression.
- ✓ Figure IV.12. Effet du dosage de ciment et de fibres de polypropylène sur la résistance en compression.

Abstract

In this study, a clay soil collected a 15 km from M'Sila region (also called Chaaba el Hamra), Algeria, is reinforced with polypropylene fibers. These fibers are incorporated into the soil with different percentages: 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 and 1% dry weight of the clay. The experimental program carried out consists to study the effect of the addition of these fibers on the geotechnical properties of the soil.

In addition to the environmental advantages of the approach proposed in this study, creating a new application for these fibers, the obtained results show that the inclusion of polypropylene fibers in the clay soils allowed improving its mechanical properties. In addition to that, this study aims to investigate the behavior of cemented fiber-reinforced soil

Key words: Soil strengthening, clay, stabilization, cement, lift, polypropylene fibers, Chemical and mechanical treatment, soil behavior.

Résumé

Dans cette étude, un sol argileux prélevé 15 km de la ville de M'Sila (dite également Chaaba el Hamra), Algérie, est renforcé par des fibres de polypropylène. Les fibres ont été incorporées dans le sol en différents pourcentages: 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 et 1% par rapport à la masse sèche du sol. Le programme expérimental entrepris consiste à étudier l'effet de l'ajout de ces fibres sur les caractéristiques géotechniques du sol.

En plus de l'avantage environnemental de l'approche proposée dans cette étude, la création d'une nouvelle application pour ces fibres en Génie Civil, les résultats obtenus montrent que l'inclusion de fibres de polypropylène dans l'argile a permis d'améliorer ses propriétés mécaniques. En plus du renforcement mécanique, l'étude traite l'effet du traitement chimique du sol renforcé par un liant hydraulique.

Mots clés : Renforcement des sols, argile, stabilisation, ciment, portance, fibres de polypropylène, Traitement chimique et mécanique, comportement du sol.

ملخص

في هذه الدراسة، تم تعزيز التربة الطينية التي تم جمعها من مدينة مسيلة عن بعد 15 كم (الشعبة الحمراء)، بواسطة الياف البوليبروبيلان . تم دمج هذه الألياف في التربة بنسب مئوية مختلفة: 0 ؛ 0,2 ؛ 0,4 ؛ 0,6 ؛ 0,8 و 1٪ بالنسبة للكتلة الجافة للتربة. يهدف البرنامج التجريبي الى دراسة تأثير إضافة هذه الألياف على الخصائص الجيوتقنية للتربة.

بالإضافة إلى الفائدة البيئية للنهج المقترح في هذه الدراسة إنشاء تطبيق لهذه الاللياف في الهندسة المدنية ، تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن إدراج ألياف البوليبروبيلان في الطين يحسن من خصائصه الميكانيكية. بالإضافة إلى التعزيز الميكانيكي، تتناول الدراسة تأثير معالجة التربة كيميائيا المقواة بواسطة رابط هيدروليكي (الإسمنت).

الكلمات المفتاحية: تقوية التربة، الطين، التثبيت، الإسمنت، الرفع، ألياف البوليبروبيلان، المعالجة الكيميائية والميكانيكية، سلوك التربة.

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des notations utilisées	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Abstract	
Résumé	
ملخص	

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
-----------------------------	---

Chapitre I

Techniques de renforcement des sols : Concepts généraux

I.1.INTRODUCTION.....	4
I.2 LES PROCEDES DE RENFORCEMENT ET D'AMELIORATION DES SOLS	4
I.2.1 Procédé mécanique.....	5
I.2.2 Procédé chimique (traitement des sols).....	6
I.3 TECHNIQUES EXPERIMENTALES UTILISEES EN LABORATOIRE POUR L'ETUDE DES SOLS RENFORCES EN FIBRES.....	7
I.3.1 Essai de compression.....	7
I.3.2 Essai Proctor.....	8
I.3.3 Essai CBR.....	9
I.3.4 Essai de cisaillement rectiligne.....	10
I.3.5 Essai triaxial.....	11
I.4. CONCLUSION.....	12

Chapitre II

Généralités sur les fibres

II.1.INTRODUCTION.....	14
II.2.STABLISATIONS PAR FIBRES.....	14

II.3.FIBRES.....	14
II.4. DIFFERENTS TYPES DES FIBRES.....	15
II.4.1.Les fibres naturelles.....	15
II.4.2.Les fibres synthétiques.....	17
II.5.LES FIBRES DE POLYPROPYLENE.....	18
II.6. LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES ET PHYSIQUES DES FIBRES DE POLYPROPYLENE	19
II.7.CONCLUSION	20

Chapitre III

Matériaux et procédures expérimentales

III.1 INTRODUCTION.....	22
III.2 LOCALISATION DU SITE DE PRELEVEMENT.....	22
III.3 CARACTERISATION DU SOL ETUDIE	22
III.3.1 Analyse chimique	22
III.3.2 Essais d'identification du sol.....	23
III.3.2.1 Analyse granulométrique	23
III.3.2.2. Les masses volumiques	25
III.3.2.3. Les limites d'Atterberg	26
III.3.2.4. L'essai au bleu de méthylène	27
III.4. CIMENT	28
III.5 PROCEDURE EXPERIMENTALE.....	29
III.6 CODAGE D'ESSAIS.....	29

Chapitre IV

Résultats & discussions

IV.1.INTRODUCTION.....	32
IV.2 ESSAIS SUR SOL NATUREL.....	32
IV.2.1 Caractéristiques du compactage	32

IV.2.2 Portance du sol.....	32
IV.3 ESSAIS SUR SOL RENFORCE DE FIBRES ET TRAITE AU CIMENT.....	33
IV.3.1 Effet des fibres sur la portance du sol sur la portance du sol.....	33
IV.3.2 Effet DES FIBRES DE POLYPROPYLENE sur la résistance en compression.	34
IV.4 ESSAIS SUR SOL TRAITE AU CIMENT.....	35
IV.4.1 Caractéristiques de compactage.....	35
IV.4.2 Effet du traitement chimique et du renforcement mécanique sur la portance du sol.....	37
IV.5 INTERPRETATION DES RESULTATS.....	43
IV.5.1 Essais sur sol naturel.....	43
IV.5.2 Effet des fibres de polypropylène sur le sol.....	43
IV.5.3 Effet des fibres de polypropylène et du traitement chimique sur le sol	44
CONCLUSION GENERALE	45

Bibliographie

Annexe

INTRODUCTION GENERALE

L'une des principales activités des ingénieurs de Génie Civil est la stabilisation des sols. Ce terme rassemble un ensemble de techniques qui ont pour but d'améliorer la résistance des sols et/ou de limiter les déformations sous des ouvrages existants. Par ailleurs, le renforcement des sols de fondations ou de remblai consiste en l'amélioration de ses caractéristiques mécaniques. En géotechnique, plusieurs techniques sont utilisées pour stabiliser le sol. Ces techniques sont basées parfois sur des approches chimiques, par l'addition des matériaux cimentaires (ciment, chaux, cendres volantes, laitier, etc.) ou sur des approches purement mécaniques par l'association d'éléments rigides au sol (terre armée). Cependant, le choix entre ces méthodes dépend du type du sol et la nature du projet. Le développement des activités industrielles envisagé dans nos jours est accompagné par des graves problèmes environnementaux, car les différentes étapes de fabrication de produits génèrent des déchets de diverses natures. En effet, la valorisation des déchets industriels dans les applications du génie civil est une préoccupation majeure pour les ingénieurs et les chercheurs. Par ailleurs, l'utilisation des différents déchets industriels dans le domaine de génie civil, qui est un grand consommateur de ressources naturels, permet non seulement de réduire le cout mais également de protéger l'environnement et parfois d'améliorer certaines caractéristiques techniques du sol ou du béton telles que la résistance, l'étanchéité, la ductilité, etc. Cette étude est inscrite dans le cadre d'un programme de recherche qui a pour but de développer de nouvelles applications de Génie Civil. De ce fait, ce travail porte sur la caractérisation d'un sol prélevé 15 km de la ville de M'Sila (Chaaba el Hamra) contenant des fibres de polypropylène. L'étude présente, en effet, des avantages majeurs sur les plans technique et environnemental. Le protocole expérimental suivi consiste en l'étude de l'effet des fibres sur les propriétés géotechniques du sol de Chaaba el Hamra. Les fibres de polypropylène ont été ajoutées au sol en différents pourcentages 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 et 1%. De plus, l'étude traite l'effet d'un traitement double (chimique et mécanique) sur le comportement du sol. Dans ce contexte, nous avons utilisé un ciment hydraulique de classe CEMII 42,5 comme agent de traitement.

Le mémoire comporte deux parties, une partie théorique dans laquelle les principes fondamentaux Techniques de renforcement des sols ont été présentés. De plus, un état de l'art sur les fibres de polypropylène et ses applications en Génie Civil, a été présenté. Dans la partie expérimentale, nous avons présenté et discuté les résultats des essais réalisés sur le sol renforcé de fibres et traité avec ciment.

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

- ✓ INTRODUCTION GENERALE.
- ✓ Chapitre I : Techniques de renforcement des sols : Concepts généraux.
- ✓ Chapitre II : Généralités sur les fibres.
- ✓ Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales.
- ✓ Chapitre IV : Résultats et discussions.
- ✓ CONCLUSION GENERALE.

Chapitre 1

Techniques de renforcement des sols : concepts généraux

I.1. INTRODUCTION

La nécessité d'utiliser des terrains de plus en plus médiocres pour les constructions de Génie Civil n'a fait que croître au cours des dernières décennies, c'est pour sa les ingénieurs ont inventé les méthodes de renforcement des sols.

Le renforcement des sols est un domaine récent et particulier de l'amélioration des sols. On peut distinguer deux grandes catégories de techniques : Celles où la structure du sol est améliorée, notamment au niveau des contacts entre les grains, par un additif, un liant, un coulis, ou modifiée par réduction des vides entre les grains, pour atteindre un état plus dense; ce sont les techniques d'amélioration des sols; Celles où l'on place dans le sol des éléments structuraux pour augmenter principalement la résistance mécanique; ce sont les techniques de renforcement des sols. Le choix entre ces méthodes dépend du type du sol et la destination du projet. Ce chapitre présente un abrégé sur les différentes techniques de renforcements des sols. [1]

I.2. LES PROCÉDES DE RENFORCEMENT ET AMÉLIORATION DES SOLS

I.2.1. Procédés mécaniques

I.2.1.1 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 écaille. Les écailles sont reliées aux armatures constituées, elles, en lanières métalliques. Alors on le résume comme suivant : Système de soutènement d'un massif ou remblai auto stable dont la stabilité est obtenue par frottement du sol sur des armatures métalliques plates et crénelées reliées à des écailles de béton.

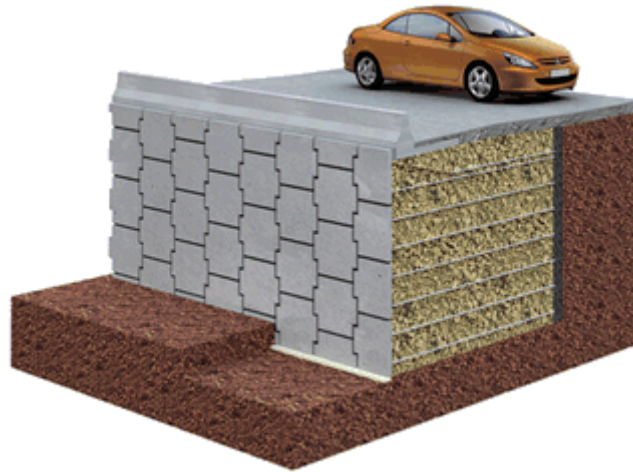


Figure I.1. Terre armée

I.2.1.2. 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: (i) les fibres peuvent simplement ajoutées et mélangées avec le sol de même manière que le ciment, la chaux et d'autres additifs, (ii) les fibres distribuées aléatoirement peuvent limiter les plans de faiblesse potentiels qui peuvent se développer parallèlement aux armatures conventionnelles orientées, (iii) 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 [2]. Le matériau sol renforcé de fibres peut être utilisé pour le renforcement des remblais derrière les ouvrages de soutènement comme en techniques routières.

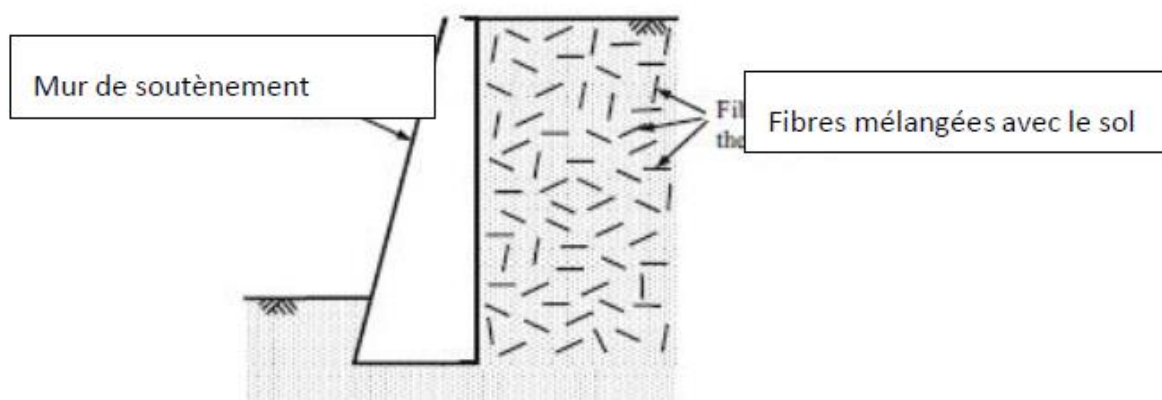


Figure I.2. Renforcement des sols

I.2.2. Procèdes chimique :**I.2.2.1. Traitement chimique des sols :**

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. [3]

I.2.2.1.1. 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 (Ca(OH)_2 , Mg(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.



Figure I.3. Traitement des sols à la chaux

I.2.2.1.2. Le traitement des sols avec ciment :

Le ciment est un additif qui peut être utilisé pour la stabilisation du sol dont il augmente la résistance, la limite de retrait, il diminue la plasticité et réduit le potentiel de variation 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. [4]



Figure I.4. Traitement des sols au Ciment

I.3. TECHNIQUES EXPERIMENTALES UTILISEES EN LABORATOIRE POUR L'ETUDE DES SOLS RENFORCES EN FIBRES :**I.3.1. Essai de compression :**

L'essai de compression est une méthode pour caractériser le comportement d'un matériau soumis à une charge d'écrasement. L'éprouvette est comprimée, puis la déformation sous diverses charges est enregistrée. La contrainte et la déformation de compression sont représentées graphiquement sous la forme d'une courbe de contrainte-déformation qui est ensuite utilisée pour déterminer la résistance à la compression.

Le principe de l'essai est de soumettre une éprouvette cylindrique, cubique ou une carotte à une force croissante et constante jusqu'à rupture de celle-ci afin de déterminer sa résistance à la compression.

Les champs de contraintes et de déformations sont :

$$\bar{\bar{\sigma}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F/S \end{bmatrix} \quad \bar{\bar{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_r & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_r & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_a \end{bmatrix}$$

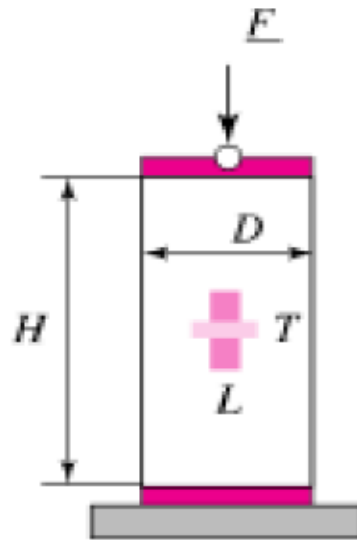


Figure I.5. Essai de compression

I.3.2. Essai Proctor :

L'essai Proctor est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire (ou non) par compactage à une énergie fixée (poids de dame, nombre de coups et dimensions normés).

L'essai consiste à damer un échantillon de sol de manière définie et répétitive en faisant varier sa teneur en eau. La mesure régulière de la teneur en eau et de la masse volumique sèche du matériau, une fois reportée sur un graphique, permet d'obtenir une courbe. L'optimum est alors déterminé par le point maximal de la courbe qui donne la teneur en eau optimale pour une masse volumique maximum. [5]



Figure I.6. Essai Proctor

I.3.3. Essai CBR: (California Bearing Ratio):

Essai en laboratoire consiste à déterminer par poinçonnement la portance d'un sol compacté dans les conditions de l'essai Proctor. Le matériel comprend un moule Proctor, un piston de poinçonnement, un dispositif d'application d'une surcharge constante et des capteurs d'effort et de déplacement selon l'indice recherché et le type de sol, l'échantillon est éventuellement soumis à une imbibition partielle ou totale avant le poinçonnement. L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés. [6]

$$\frac{F_{2,5} \times 100}{13,35}$$

$$\frac{F_5 \times 100}{20}$$

Avec:

$F_{2,5}$ est l'effort de pénétration correspondant à un enfoncement de 2,5 mm, exprimé en kN

F_5 est l'effort de pénétration correspondant à un enfoncement de 5mm, exprimé en kN

On compacte avec une dame standard dans un moule standard l'échantillon de sol recueilli sur le site, selon un processus bien déterminé, à la teneur en eau optimum (Proctor modifié) avec trois 3 énergies de compactage 25c/c ; 55c/c ; 10c/c imbibé pendant 4 jours.



Figure I.7. Essai CBR

I.3.4. Essai de cisaillement rectiligne :

Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante. L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne ϕ et sa cohésion C . Ces valeurs servent entre autre à déterminer la contrainte admissible par le sol dans le cas de fondations superficielles et la poussée du sol sur un mur de soutènement. [7]

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre (Fig.I.8). Un piston d'exercer sur le sol une contrainte normale σ déterminée. La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante.

La force totale de cisaillement F est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-botte supérieure. Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon. L'échantillon subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan imposé sur lequel on exerce une contrainte normale déterminée. [8]

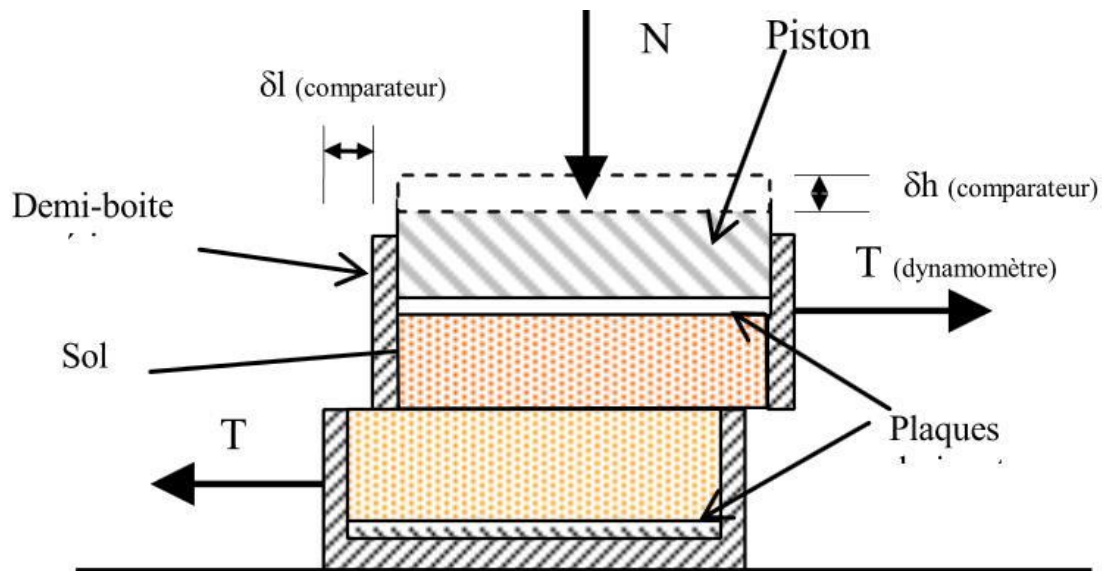


Figure I.8. Schéma de principe de l'essai de cisaillement à la boîte

Malgré ses inconvénients ; la difficulté de contrôler le drainage et vu que le plan de rupture est préalablement imposé, l'essai de cisaillement à la boîte est loin le plus utilisé en géotechnique pour déterminer les caractéristiques de résistance aussi bien pour les sols naturels que pour les sols renforcés de fibres, grâce à sa simplicité.

I.3.5. Essai Triaxial :

L'essai de compression triaxiale est un essai de laboratoire courant dans le domaine de géotechnique, l'essai triaxial permet de mieux accéder aux propriétés mécaniques des matériaux, car il affecte l'état de contraintes in situ. L'essai est réalisé sur des éprouvettes cylindriques de sol saturé. L'éprouvette est placée dans une cellule cylindrique remplie d'eau. La surface latérale de l'éprouvette est protégée par une gaine élastique étanche. Des pierres poreuses saturées placées aux extrémités de l'éprouvette peuvent être mises en communication avec l'extérieur de la cellule afin d'assurer le drainage en cours d'essai. Elles peuvent également être reliées à un appareil de mesure de la pression interstitielle. [7]

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

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

La mesure de la pression interstitielle impose une saturation parfaite. La saturation du dispositif est réalisée par la méthode de la contre pression : application simultanée d'une

pression interstitielle et d'une contrainte totale isotrope qui restent constantes pendant tout l'essai. [8]

- Schéma de l'appareil triaxial -

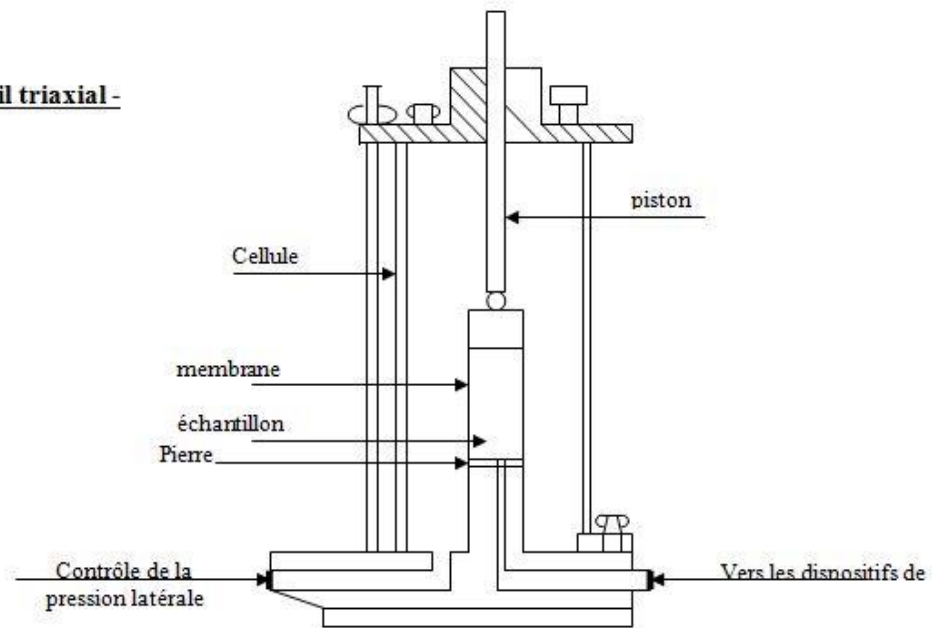


Figure I.9. Essai Triaxial

I.4. CONCLUSION

Le renforcement des sols de fondations ou de remblai permet de l'amélioration de la résistance sous l'effet des sollicitations appliquées. Plusieurs techniques sont utilisées pour stabiliser le sol. Ces techniques sont basées parfois sur des approches chimiques, par l'addition des matériaux cimentaires (ciment, chaux, cendres volantes, laitier, etc.) ou sur des approches purement mécaniques par l'association d'éléments rigides au sol (terre armée). Vue la simplicité de là l'incorporation des fibres dans les sols, les techniques expérimentales, utilisées généralement pour caractériser les sols naturels, sont valables pour les sols renforcés en fibres.

Chapitre 2

GENERALITES SUR LES FIBRES

II.1. INTRODUCTION

Les fibres avec leurs variétés comme (caoutchouc, fibre métallique, polypropylène, fibre de verre, etc.) sont utilisées avec succès dans plusieurs applications du Génie Civil ; dans le béton et le mortier sous forme de granulats, en géotechnique pour les remblais légers, et également dans les mélanges d'asphaltes, Les études montrent que l'utilisation des fibres dans le domaine de Génie Civil, permet non seulement de réduire le cout, mais également d'améliorer certaines caractéristiques physico-mécaniques du béton et du sol en bénéficiant de leur déformabilité, étanchéité et de leur capacité d'absorption des chocs. Dans ce chapitre on présente un état de l'art sur l'utilisation des fibres en Génie Civil.

II.2 STABILISATION PAR FIBRES

La stabilisation des sols par fibres est une technique moderne qui consiste incorporer des fibres au sein du sol pour but de renforcement et la stabilisation de ce dernier, Pour le cas des fibres synthétiques, elles sont utilisées généralement pour augmenter les résistances à la compression et au cisaillement (Estabragh, 2011 ; Prabakar, 2002).



Figure II.1. Stabilisation avec fibres

II.3 LES FIBRES

Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériaux qui a été introduite dans le commerce comme de nouvelles applications. Elles sont classées selon leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur forme (droite, ondulée, aiguille,...etc.), leur dimension (macro ou microfibre), leur longueur (continu ou discret) et

aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour une application donnée, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et le mode de performance du composite. [9]

Les travaux de recherche de littérature montrent que l'introduction des fibres dans un sol change ses propriétés géotechniques. Les principaux résultats rapportés par les auteurs sont:

- L'incorporation des fibres de polypropène a un effet considérable sur le comportement de sols aussi bien cohérents que pulvérulents.
- Les déformations s'évaluent plus lentement en présence de fibres, ce qui signifie que l'existence des fibres dans le sol réduit la cinétique de développement des déformations et rend la rupture plus ductile.
- La résistance au cisaillement et le déplacement maximal à la rupture, augmente avec l'augmentation des dosages en fibres.
- L'existence de la fibre dans le sol empêche le déplacement relatif entre les grains créant ainsi un frottement supplémentaire pour les sols sableux et une cohésion additionnelles pour le cas des argiles.

En résumé, le renforcement des sols par des éléments discrets sous forme de fibres, permet d'améliorer les propriétés géotechniques du sol. [10]

II.4 DIFFERENTS TYPES DE FIBRES

Plusieurs types de fibres sont généralement utilisés en géotechnique, elles peuvent être classées par famille :

II.4.1. Les fibres naturelles : On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine :

II.4.1.1. Les fibres végétales : l'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de CO₂ et demandant peu d'énergie pour être produites.

Les fibres végétales 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 fruits (noix de coco). [9]



Figure II.2. Les différents types des fibres naturelles (a-coton, b- chanvre, c- sisal, d- noix de coco)

II.4.1.2 Les fibres animales : La fibre la plus importante et la plus utilisée est la fibre de laine connue pour ses qualités de bon isolant thermique, son pouvoir absorbant élevé (16-18%) et son élasticité importante (45%) (Feughelman, 1997).

Les fibres animales sont classées selon leur provenance, on note essentiellement :

- Poils : la laine (obtenue par la tonte de moutons), alpaga, angora, chameau, cachemire ...
- Sécrétions. [9]



Figure.II.3. Les fibres de laine

Classification des fibres naturelles :

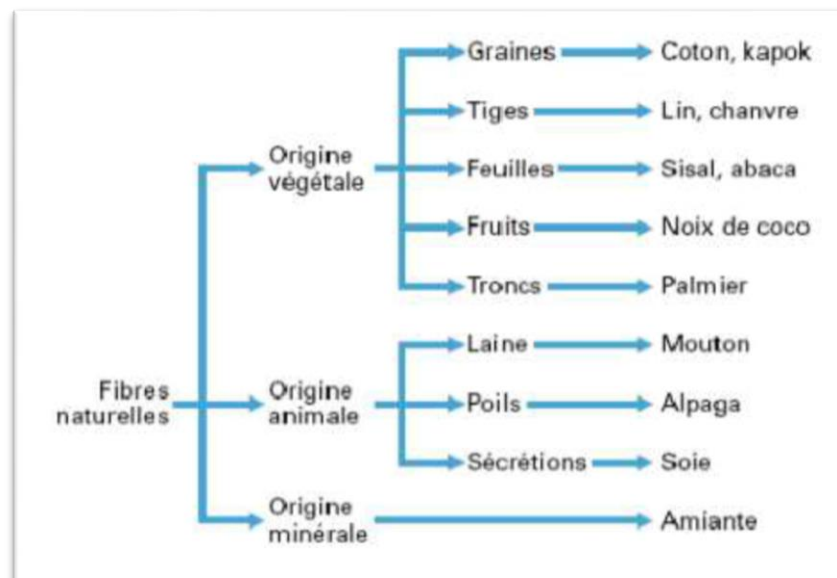


Figure II.4. Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013)

II.4.2. Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenus à partir de substances fournis par l'industrie pétrochimique. Elles ont fait leurs apparitions au début de 20^{ème} siècle, après la réussite de la fibre de Viscose, 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.

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 (Quinn, 2002). [9]

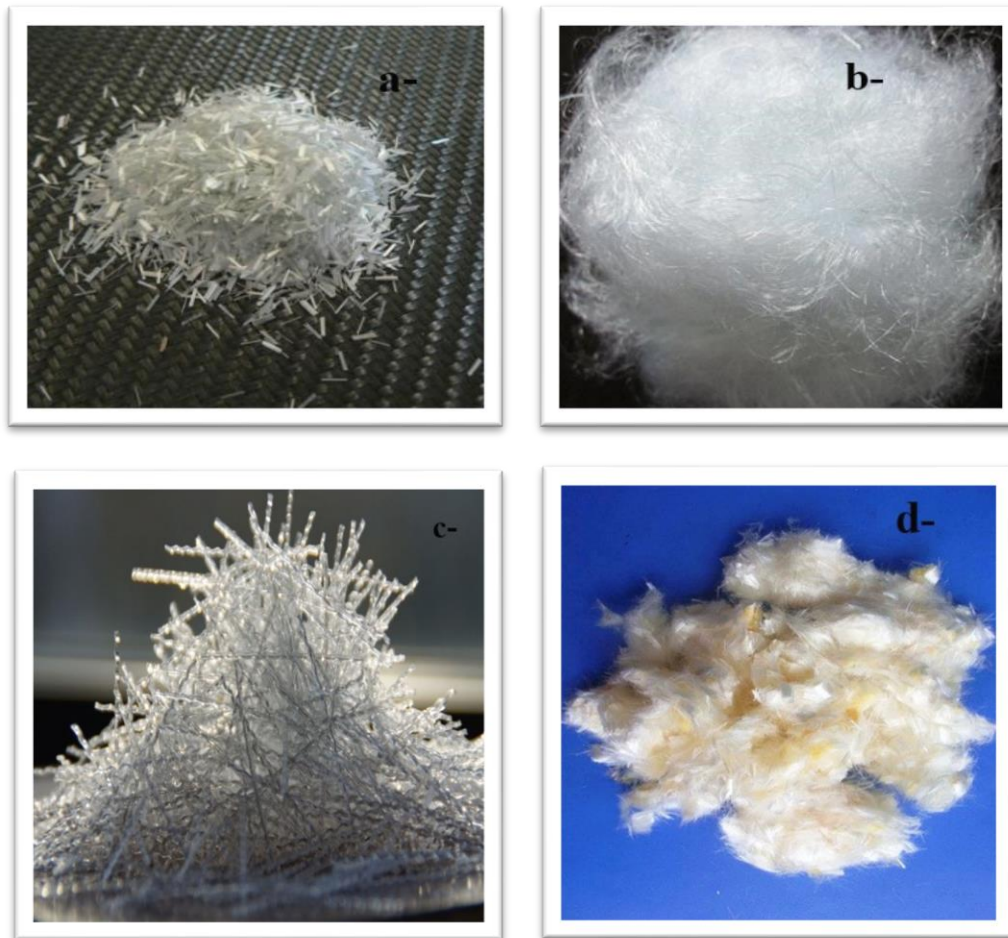


Figure.II.5. Les différents types des fibres synthétiques (a-polyamides, b-polyesters, c-polyvinyliques, d-polyéthylène)

II.5. 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.



Figure.II.6. Fibres de polypropylène

II.6. LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES ET PHYSIQUES DES FIBRES DE POLYPROPYLENE

Les caractéristiques mécaniques et physique des fibres de polypropylène est résumé dans le tableau suivant :

Tableau.II.1. Les caractéristiques mécaniques et physiques des fibres polypropylène

Fibres	Polypropylène
Diamètre (μm)	10-200
Longueur (mm)	25-75
Densité	0.9
R_t MPa	400-750
$E \cdot 10^3$ MPa	5-10
Allongement à la rupture en %	15-25
Coefficient de dilatation (μ/m)	90
R_{feu} Temps Max $^{\circ}\text{C}$	150

II.7. CONCLUSION

L'utilisation des fibres dans le domaine du génie civil a connu un développement rapide durant les dernières années. Dans de nombreuses applications, l'utilisation des fibres peut augmenter le facteur de sécurité, et réduire les coûts en comparaison avec les matériaux classiques.

Chapitre III

*Matériaux et
procédures
expérimentales*

III.1. INTRODUCTION

L'objectif principal de ce travail est l'étude de l'influence des fibres de polypropylène et le traitement par ciment sur les propriétés mécaniques de sol de Chaaba el Hamra. Ce chapitre a pour objectif de présenter les résultats d'identification de sol. De plus, une brève description du site de prélèvement du sol étudié qui a été présenté.

III.2. LOCALISATION DU SITE DE PRELEVEMENT

Le site de prélèvement est situé dans 15 km de la ville de M'Sila (dite également Chaaba el Hamra). Cet endroit se trouve à la partie Nord de la commune de M'Sila (Algérie) (Figure III.1).



Figure.III.1. Localisation du site de prélèvement

III.3. CARACTERISATION DU SOL ETUDIE

III.3.1. Analyse chimique

Tableau.III.1. Analyse chimique du sol

Caractéristique	Symbole	Unité	Valeur
Silice	SiO ₂	%	34,68
La Chaux	CaO	%	22,52
La Magnésie	MgO	%	4,66
L'Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	%	3,44
L'Alumine	Al ₂ O ₃	%	9,16
Les Sulfates	SO ₃	%	0,94
L'Oxyde de potassium	K ₂ O	%	1,10
L'Oxyde de sodium	Na ₂ O	%	0,14
Chlore	Cl	%	0,63
Facteur d'activation plaquettaire	PAF	%	22,98

III.3.2 ESSAIS D'IDENTIFICATION DU SOL

III.3.2.1 Analyse granulométrique :

Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification et elle s'effectue en deux opérations successives et complémentaires:

- L'analyse granulométrique par tamisage du sol à l'eau suivant le mode opératoire de la norme (NF P 94-056). Cet essai réalisé sur la fraction supérieur à 0.08mm (Figure III.2).
- Par sédimentométrie (NF P 94-057) de la fraction inférieure à 0.08 mm Les particules du sol sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et de la profondeur d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données (Figure III.3).



Figure.III.2. Appareillage d'analyse granulométrique par tamisage



Figure.III.3. Appareillage d'analyse granulométrique par sédimentométrie

Les tableaux (III.2) et (III.3) montrent les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie, respectivement.

Tableau.III.2. Analyse granulométrique par tamisage

Tamis (mm)	Refus %	Refus cumulées (g)	Passants %	Passants (g)
2	0	0	100	500
1,25	3	15	97	485
1	5	25	95	475
0,63	9	45	91	455
0,4	12	60	88	440
0,2	20	100	80	400
0,1	26	130	74	370
0,08	27	135	73	365

Tableau.III.3. Analyse granulométrique par sédimentométrie

Tamis (mm)	Refus %	Refus cumulées (g)	Passants %	Passants (g)
0,075	34,09	165,45	65,91	329,55
0,055	41,19	200,95	58,81	294,05
0,038	48,28	236,4	51,72	258,6
0,025	55,38	271,9	44,62	223,1
0,017	62,47	307,35	37,53	187,65
0,012	73,11	360,52	26,89	134,45
0,008	83,75	413,72	16,25	81,25
0,005	90,85	449,22	9,15	45,75
0,002	96,33	476,62	3,67	18,35

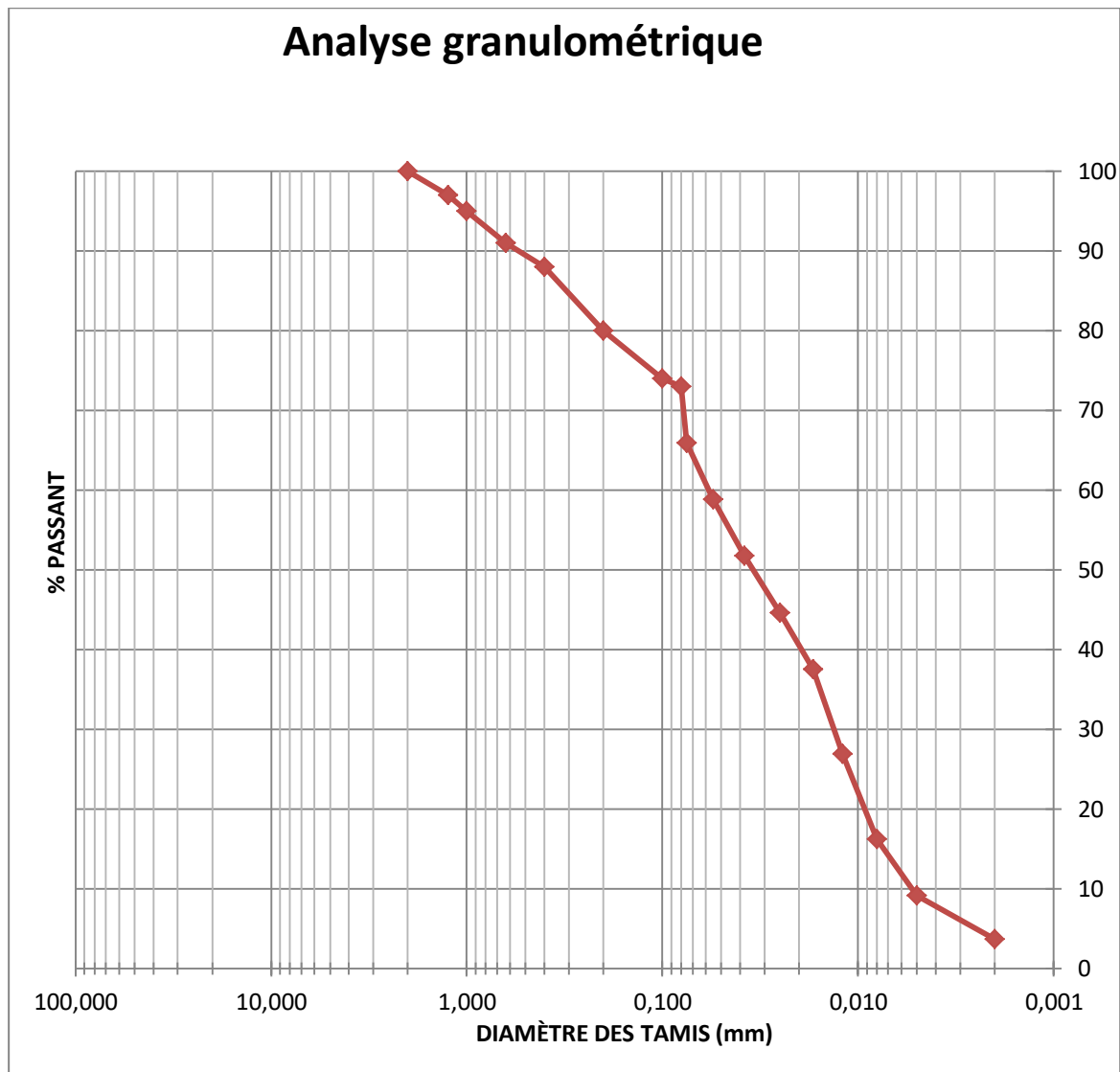


Fig.III.4. Courbe Analyse granulométrique

III.3.2.2 Les masses volumiques

Le tableau 2.1 montre les masses volumiques apparente et absolue du sol étudié.

Tableau.III.4. Les masses volumiques du sol

Masse volumique apparente / état lâche (kg/m ³)		Masse volumique apparente / état compact (kg/m ³)		Masse volumique absolue (kg/m ³)	
Valeur (g/cm ³)	Moyenne (g/cm ³)	Valeur (g/cm ³)	Moyenne (g/cm ³)	Valeur (g/cm ³)	Moyenne (g/cm ³)
1,195	1,207	1,347	1,371	2,5	2,5
1,218		1,368		2,35	
1,208		1,399		2,66	

III.3.2.3 Les limites d'Atterberg (NF P94-051)

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité (WL).
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité (Wp).

Ces limites ont pour valeur de la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute.

La différence $I_p = W_L - W_p$ qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon



Figure.III.5. Essai et matériels de limite d'Atterberg

Tableau.III.5. Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg

W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)
26	18	8

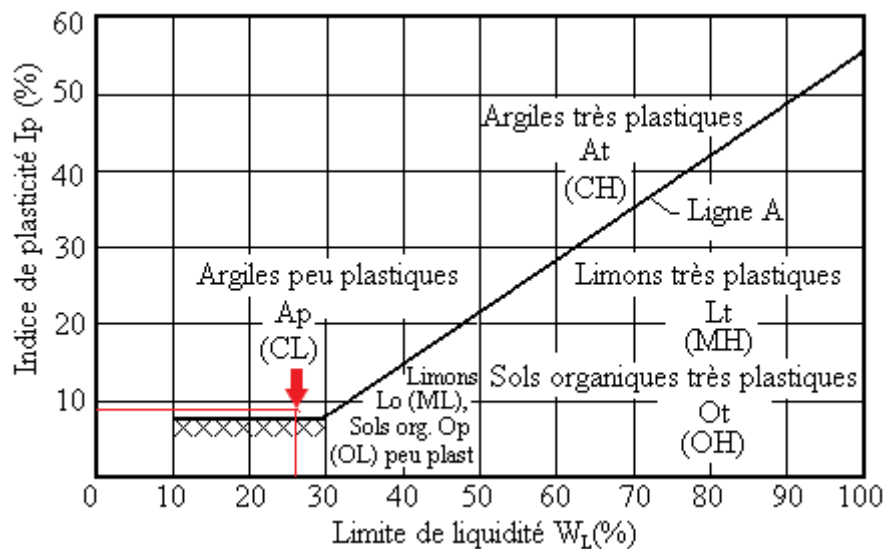


Figure III.6. Diagramme de Casagrande

D'après les valeurs obtenues de l'essai de limites d'Atterberg et le diagramme de Casagrande il s'agit que le sol étudié est une argile peu plastique Ap (CL)

III.3.2.4 L'essai au bleu de méthylène (NA1948, NF P 94-068)

L'essai est réalisé sur la fraction < 0.08 mm, il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire à la saturation des particules argileuses en suspension dans l'eau et en permanence agitation.

La valeur au bleu de méthylène constitue un paramètre d'identification permettant de mesurer la surface spécifique des particules solides contenues dans les sols fins et de déterminer l'activité de leur fraction argileuse.



Figure III.7 Appareillage de l'essai bleu au méthylène

Tableau.III.6. Valeurs au bleu de méthylène par l'essai à la tâche

Essai N°	Masse du sol (g)	Volume de la solution (cm ³)	VBS
Essai 1	80	125	1,68
Essai 2	80	115	1,56
Moyenne	80	120	1,62

La valeur de bleu au méthylène VBS est égale à 1,62. D'après la norme française (NF P 11-300), il s'agit d'un sol argileux peu plastique.

Le tableau.III.7 résume les caractéristiques d'identification des essais effectués sur le sol.

Tableau.III.7. Caractéristiques d'identification du sol

Paramètres	Valeur
Limite de liquidité W_L	26
Limite de plasticité W_P	18
Indice de plasticité I_p	8
Valeur de bleu de méthylène VBS	1,62
Surface spécifique totale (m ² /g)	34,02
Passants à 2 mm (%)	100
Passants à 80 µm (%)	73
Passants à 2 µm (%)	3,67
Indice de consistance I_c	1,2

III.4.CIMENT

Dans ce travail nous avons utilisé un ciment de type de classe 42,5 d'Ain Touta produit à l'usine de la wilaya de Batna, Les caractéristiques chimiques du ciment utilisé tirées à la fiche technique sont regroupées dans le Tableau ci-après :

Tableau.III.8. Pourcentage des éléments chimiques du ciment

L'analyse chimique	Pourcentage (%)
Perte au feu, (NA 5042)	7,50 – 12,00
Résidus insoluble (NA 5042)	0,70– 2,00
Teneur en sulfates SO ₃ (NA 5042)	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO	1,00 _ 2,20
Teneur en chlorures (NA 5042)	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis	0,3 – 0,75

III.5. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Afin d'étudier l'effet de l'ajout des fibres de polypropylène sur les propriétés techniques du sol de Chaaba el Hamra, nous avons utilisé cinq pourcentages de fibres 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1.

D'un autre côté, pour analyser l'effet d'un traitement combiné, chimique et mécanique nous avons travaillé avec trois pourcentages de ciment 5, 7 et 9%. Les différentes combinaisons obtenues sont comparées avec le sol naturel (sans traitement). Les différents essais de laboratoire ont été réalisés suivant les modes opératoires des normes en vigueur. Le Tableau III.9 regroupe les différents essais réalisés sur le sol naturel et traité.

Tableau.III.9. Les essais expérimentaux du sol étudié

Essai	Norme
Analyse granulométrique par tamisage	NF P 94-056
Analyse granulométrique par sédimentométrie	NF P 94-057
Les limites d'Atterberg	NF P94-051
L'essai au bleu de méthylène	NF P 94-068
Proctor	NF P94-093
CBR	NF P 94-078
La résistance à la compression	NF P 94-077

III.5. CODAGED'ESSAIS

Pour faciliter l'interprétation des résultats le codage suivant a été adopté:

C_A/F_B

Avec :

C : désigne le ciment

A : pourcentage du ciment utilisé

F : fibres

B : pourcentage des fibres ajouté

Tableau.III.10. Codage d'essais.

Code	Sol %	Ciment %	Fibre %
C_0/F_0	100	0	0
C_0/F_0,2	100	0	0,2
C_0/F_0,4	100	0	0,4
C_0/F_0,6	100	0	0,6
C_0/F_0,8	100	0	0,8
C_0/F_1	100	0	1
C_5/F_0	95	5	0
C_5/F_0,2	95	5	0,2
C_5/F_0,4	95	5	0,4
C_5/F_0,6	95	5	0,6
C_5/F_0,8	95	5	0,8
C_5/F_1	95	5	1
C_7/F_0	93	7	0
C_7/F_0,2	93	7	0,2
C_7/F_0,4	93	7	0,4
C_7/F_0,6	93	7	0,6
C_7/F_0,8	93	7	0,8
C_7/F_1	93	7	1
C_9/F_0	91	9	0
C_9/F_0,2	91	9	0,2
C_9/F_0,4	91	9	0,4
C_9/F_0,6	91	9	0,6
C_9/F_0,8	91	9	0,8
C_9/F_1	91	9	1

Chapitre IV
Résultats et
discussions

IV.1. INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objet de présenter et interpréter l'ensemble des résultats des essais réalisés sur le sol de Chaaba el Hamra. La première partie du chapitre est consacrée aux résultats d'essais effectués sur le sol naturel, tandis que la deuxième partie traite le comportement du sol renforcé par les fibres de polypropylène et traité au ciment.

IV.2.ESSAIS SUR SOL NATUREL

IV.2.1 Caractéristiques du compactage

Les résultats de l'étude des propriétés du compactage sont présentés dans le Tableau IV.1 et la Figure IV.1

Tableau IV.1. Résultats de l'essai Proctor normal du sol naturel

Proctor normal		
$\omega_{opt}(\%)$	$\rho_d \max (g/cm^3)$	$S_r(\%)$
16,4	1,79	59.318

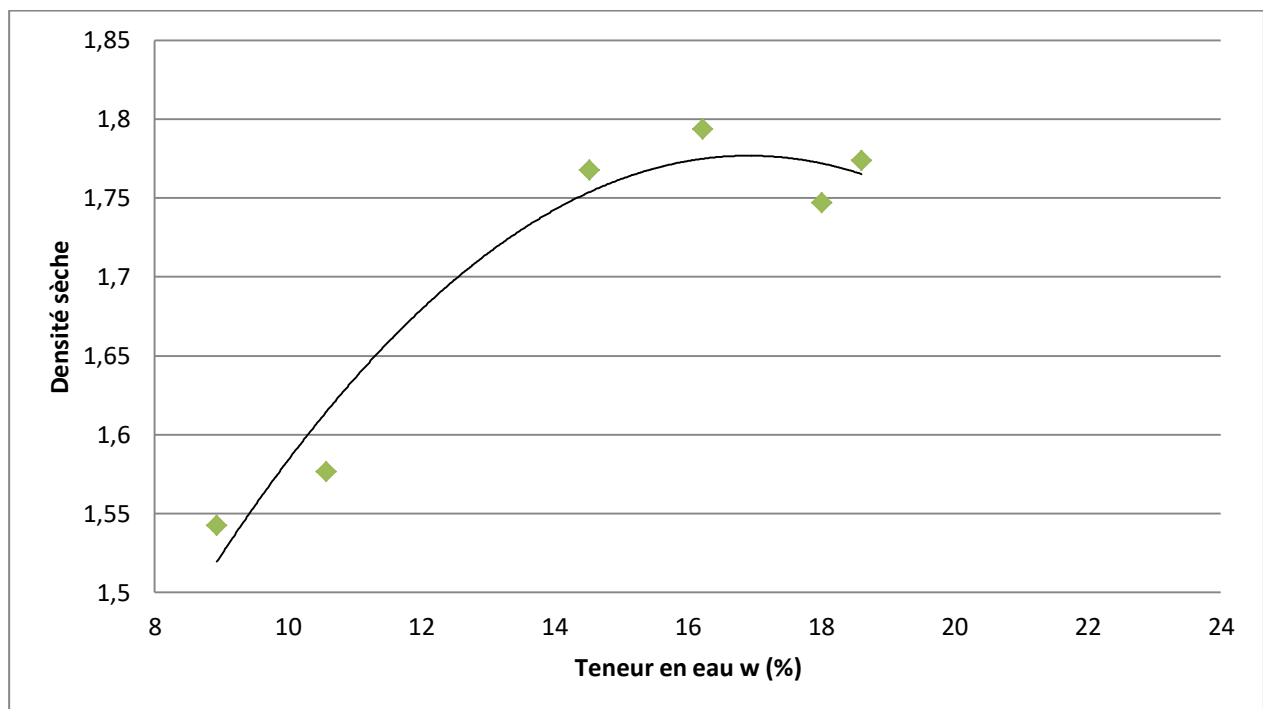


Figure IV.1. Courbe de Proctor normal du sol naturel

IV.2.2 Portance du sol

IV.2.2.1 CBR immédiat

Le Tableau IV. 2 et présente les résultats de l'essai CBR immédiat des éprouvettes compactées avec l'énergie Proctor modifié.

Tableau IV.2. Résultats de l'essai CBR Immédiat du sol naturel

		Essai 1							
Enfoncements		0	0,675	1,25	2	2,5	5	7,5	10
Force de poinçonnement(KN)		0	0,11	0,22	0,44	0,55	0,87	1,7	2,39
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)		4,11							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)		4,34							
Indice C, B, R max (%)		4,34							
		Essai 2							
Enfoncements		0	0,675	1,25	2	2,5	5	7,5	10
Force de poinçonnement(KN)		0	0,18	0,27	0,46	0,67	1,21	2,16	2,93
Indice C, B, R immédiat à 2,5mm(%)		5,01							
Indice C, B, R immédiat à 5mm(%)		6,034							
Indice C, B, R max (%)		6,034							

IV.3. ESSAIS SUR SOL RENFORCE DE FIBRES ET TRAITE DE CIMENT

IV.3.1.Effet des fibres sur la portance du sol

IV.3.1.1. Effet de fibres de polypropylène sur le poinçonnement

Le Tableau IV.3 et la Figure IV.2 présentent les variations des efforts de poinçonnement immédiat en fonction du dosage en fibres dans le sol

Tableau IV.3.Effet de fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat

% des fibres		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Temps (s)	Enfoncement (mm)						
0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,675	0,22	0,21	0,37	0,43	0,97	0,22
4	1,25	0,56	0,43	0,56	0,65	1,33	0,43
6	2	0,87	0,86	0,93	1,30	1,95	0,75
8	2,5	1,09	1,31	1,52	2,03	2,60	1,68
15	5	1,52	1,73	1,87	2,82	3,04	2,39
23	7,5	2,39	2,61	2,83	3,49	3,69	3,04
35	10	3,04	3,26	3,37	3,99	4,13	3,47
ICBR à 2,5 mm (%)		8,16	9,81	11,38	15,20	19,47	12,58
ICBR à 5 mm (%)		7,58	8,62	9,32	14	15,16	11,92
ICBR max (%)		8,16	9,81	11,38	15,20	19,47	12,58

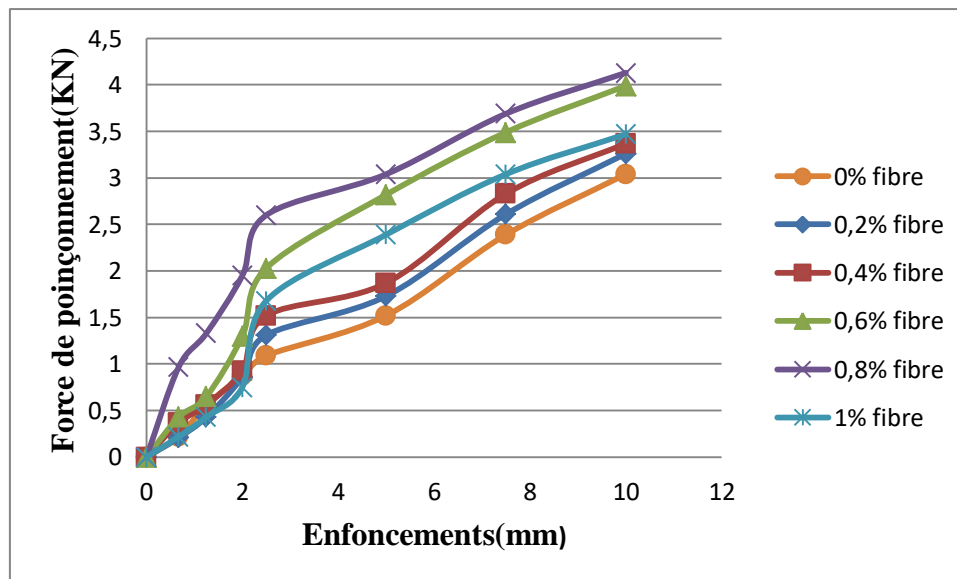


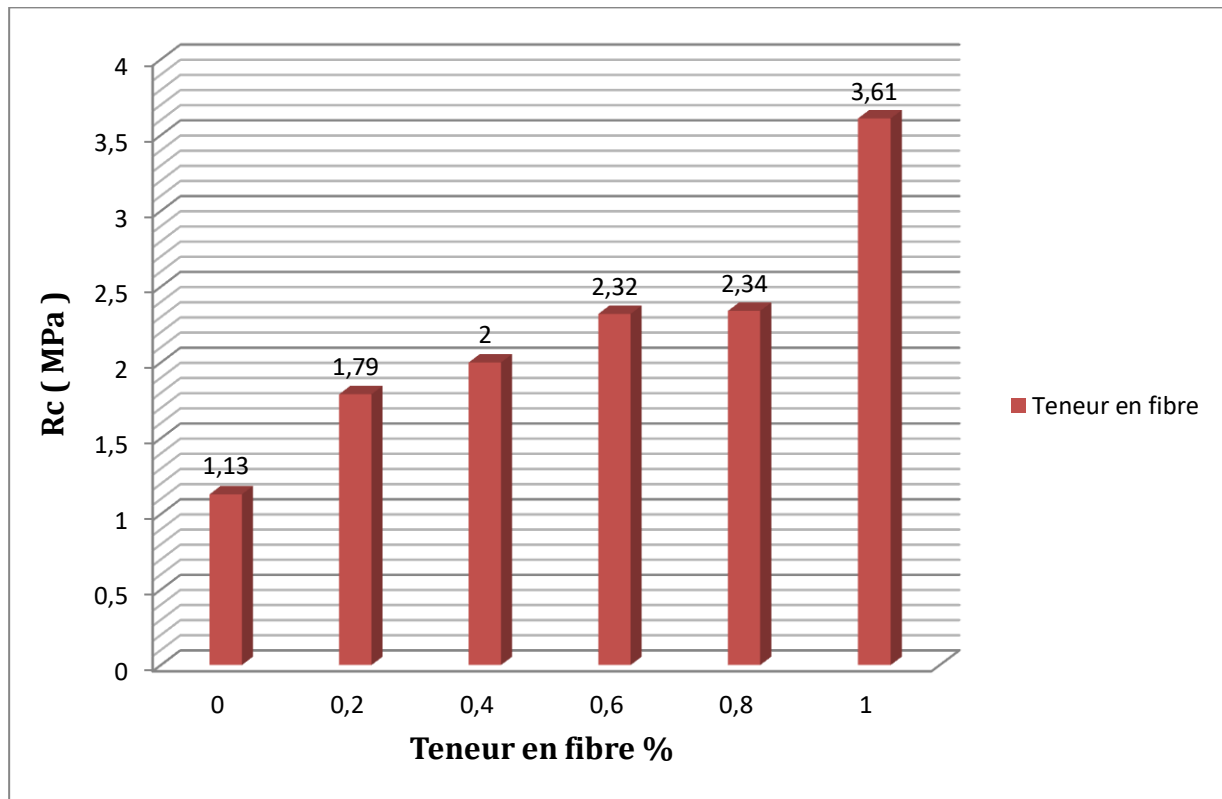
Figure IV.2. Effet des fibres de polypropylène sur le comportement du sol au poinçonnement immédiat

IV.3.2. Effet des fibres de polypropylène sur la résistance en compression

Le Tableau IV.4 et la Figure IV. 3 présentent la variation de la résistance en compression en fonction des concentrations des fibres dans le sol.

Tableau IV.4. Effet des fibres de polypropylène sur la résistance en compression

Teneur en Fibre %	Eprouvettes	La charge (kN)	Résistance à la compression (MPa)	Rc moyenne (MPa)
0	1	2,3	1,17	1,13666667
	2	1,9	0,97	
	3	2,5	1,27	
0,2	1	2,7	1,38	1,79
	2	3,7	1,87	
	3	4,2	2,12	
0,4	1	3,5	1,76	2
	2	3,3	1,7	
	3	5	2,54	
0,6	1	4	2,06	2,32666667
	2	3,8	1,96	
	3	5,8	2,96	
0,8	1	4,3	2,2	2,34333333
	2	5	2,55	
	3	4,5	2,28	
1	1	8,2	4,2	3,61666667
	2	4,7	2,4	
	3	8,3	4,25	



FigureIV.3. Effet de fibres de polypropylène sur la résistance en compression

IV.4.ESSAIS SUR SOL TRAITÉ AU CIMENT

IV.4.1 Caractéristiques de compactage

Le Tableau IV.5-7 et la figure IV.4-6 montre l'effet du traitement chimique du sol de Chaaba el Hamra sur la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale

Tableau IV.5. Effet de traitement chimique (5% Ciment) sur les caractéristiques de compactage

Teneur en ciment (%)	5
Densité ρ_d max (g/cm ³)	1,755
Teneur en eau optimale ω_{opm} (%)	17,4
Rapport ($\gamma_{dmax} / \omega_{opm}$)	0,10

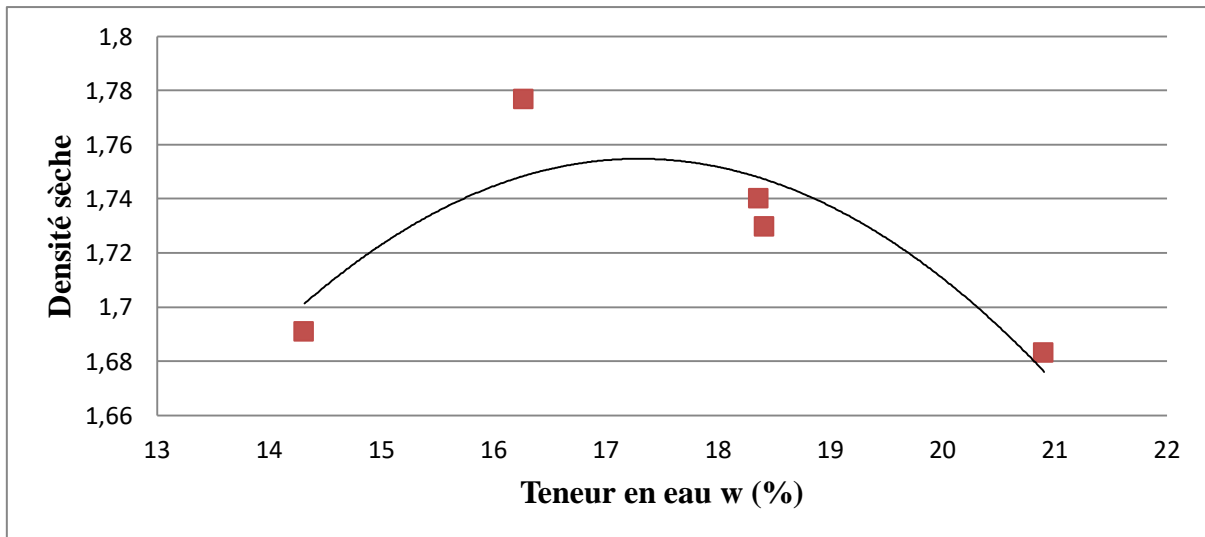


Figure IV.4. Courbe Proctor normal Pour 5% de ciment

Tableau IV.6.Effet de traitement chimique (7% Ciment) sur les caractéristiques de compactage

Teneur en ciment (%)	7
Densité ρ_d max (g/cm ³)	1,725
Teneur en eau optimale ω_{opm} (%)	19,3
Rapport ($\gamma_{dmax} / \omega_{opm}$)	0,09

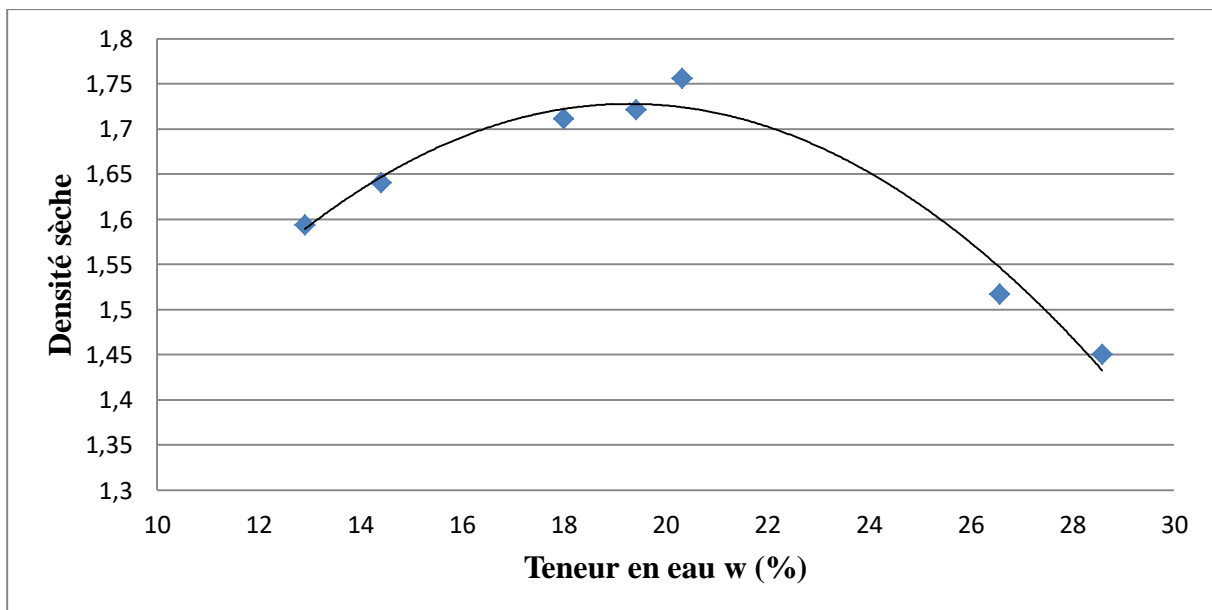


Figure IV.5. Courbe Proctor normal Pour 7% de ciment

Tableau IV.7.Effet de traitement chimique (9% Ciment) sur les caractéristiques de compactage

Teneur en ciment (%)	9
Densité ρ_d max (g/cm ³)	1,68
Teneur en eau optimale ω_{opm} (%)	21
Rapport ($\gamma_{dmax} / \omega_{opm}$)	0,08

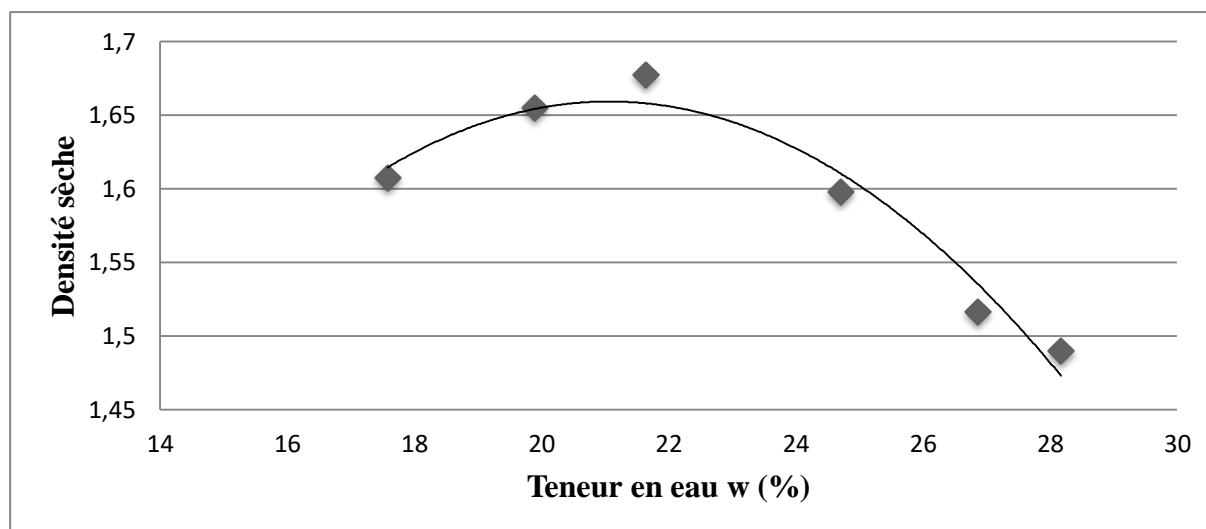


Figure IV.6. Courbe Proctor normal Pour 9% de ciment

IV.4.2 Effet du traitement chimique et du renforcement mécanique sur la portance du sol

IV.4.2.1 Effet du traitement chimique et du renforcement mécanique sur le poinçonnement

Le Tableau IV.8 IV.9 IV.10 et la Figure IV.7 IV.8 IV.9 montre les effets de ciment et de fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat.

Tableau IV.8. Effet de ciment (5% Ciment) et des fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat

% des fibres		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Temps (s)	Enfoncement (mm)						
0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,675	0,34	0,22	0,27	0,37	0,45	0,22
4	1,25	0,54	0,43	0,64	0,65	0,65	0,56
6	2	0,87	0,65	0,87	0,93	1,09	0,87
8	2,5	1,27	1,08	1,09	1,30	1,42	1,09
15	5	2,18	1,34	1,93	2,41	2,61	2,18
23	7,5	2,71	1,96	2,82	3,26	3,92	3,27
35	10	3,26	2,60	3,11	4,13	5,21	4,20
ICBR à 2,5 mm (%)		9,50	8,08	8,16	9,74	10,64	8,16
ICBR à 5 mm (%)		10,87	6,69	9,62	12,01	13,02	10,87
ICBR max (%)		10,87	8,08	9,62	12,01	13,02	10,87

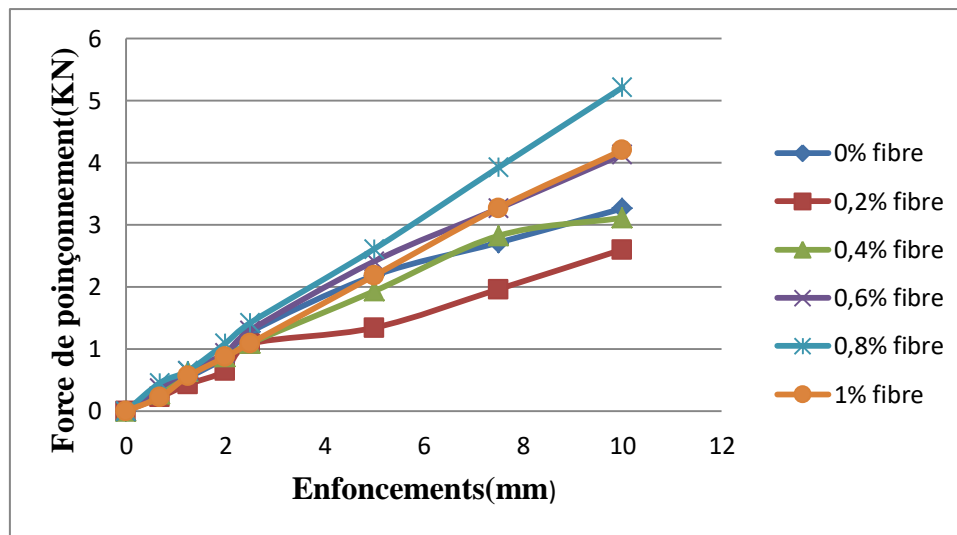


Figure IV.7. Effet de ciment (5% Ciment) et des fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat

Tableau IV.9. Effet de ciment (7% Ciment) et des fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat

% des fibres		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Temps (s)	Enfoncement (mm)						
0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,675	0,22	0,44	0,22	0,22	0,38	0,21
4	1,25	0,43	0,65	0,65	0,67	0,66	0,43
6	2	0,65	0,87	1,09	0,87	1,09	0,65
8	2,5	1,09	1,09	1,30	1,09	1,31	0,76
15	5	1,31	1,96	2,39	1,84	2,72	1,09
23	7,5	1,84	2,61	3,27	2,61	3,91	1,74
35	10	2,61	3,26	4,13	3,48	5,00	2,40
ICBR à 2,5 mm (%)		8,16	8,16	9,74	8,16	9,82	5,69
ICBR à 5 mm (%)		6,53	9,78	11,92	9,18	13,57	5,43
ICBR max (%)		6,53	9,78	11,92	9,18	13,57	5,69

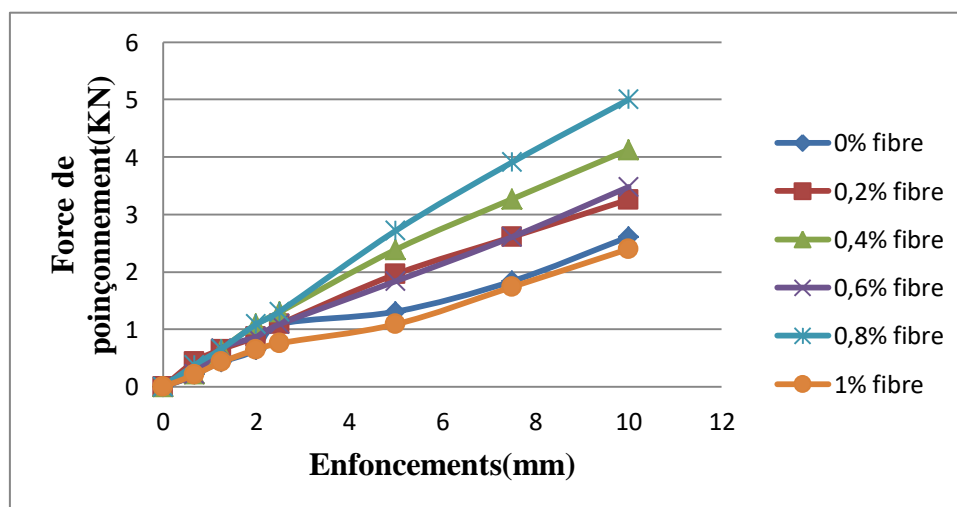


Figure IV.8. Effet de ciment (7% Ciment) et des fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat

Tableau IV.10. Effet de ciment (9% Ciment) et des fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat

% des fibres		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Temps (s)	Enfoncement (mm)						
0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,675	0,17	0,22	0,36	0,43	0,44	0,12
4	1,25	0,43	0,66	0,65	0,54	0,66	0,21
6	2	0,98	0,87	0,75	0,76	0,87	0,44
8	2,5	1,01	1,08	1,02	0,98	1,31	0,54
15	5	1,34	2,17	2,01	1,96	2,61	0,87
23	7,5	1,63	3,26	3,13	2,83	3,70	1,64
35	10	2,01	4,35	3,97	3,91	4,80	2,40
ICBR à 2,5 mm (%)		7,56	8,09	7,65	7,34	9,81	4,05
ICBR à 5 mm (%)		6,68	10,83	10,02	9,77	13,02	4,34
ICBR max (%)		7,56	10,83	10,02	9,77	13,02	4,34

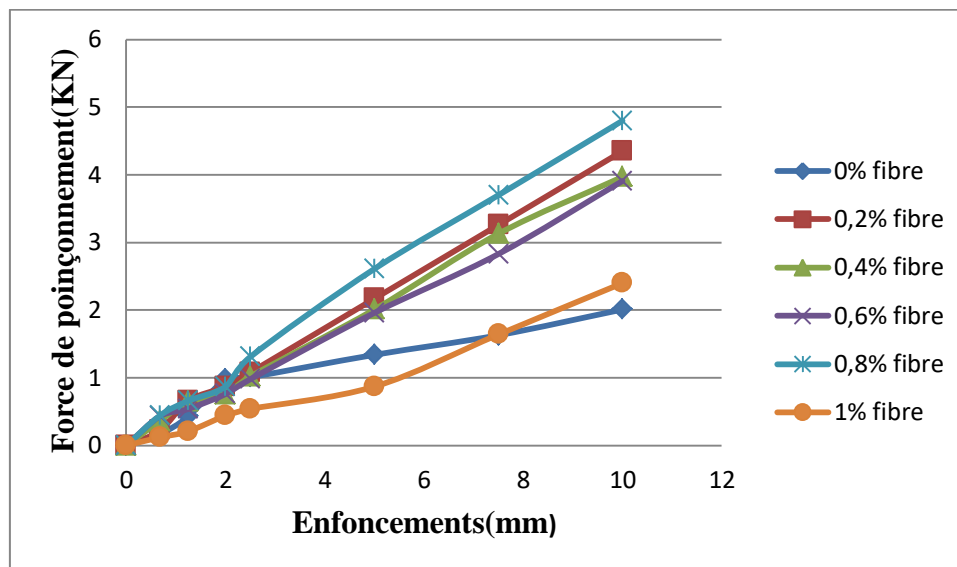


Figure IV.9. Effet de ciment (9% Ciment) et des fibres de polypropylène sur l'indice CBR immédiat

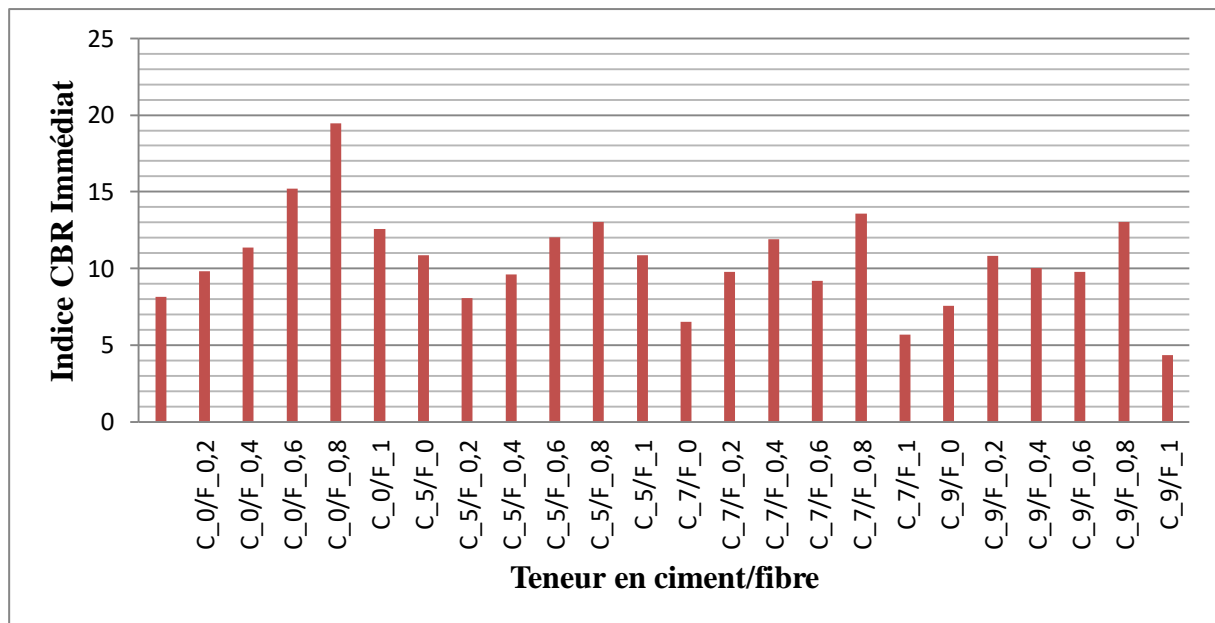


Figure.IV.10.Effet de ciment et des fibres de polypropylène combiné sur l'indice CBR immédiat

IV.4.4.2 Effet du traitement chimique et du renforcement mécanique sur la résistance en compression.

Le Tableau IV.11 et la Figure IV.10 IV.11 montre les effets de fibres de polypropylène et de ciment sur la résistance en compression.

Tableau IV.11 : Effet des fibres de polypropylène et le ciment sur la résistance en compression.

Teneur en ciment/fibre	Eprouvettes	La charge (kN)	Résistance à la compression (MPa)	Rc moyenne (MPa)
C_5/F_0	1	1,8	0,93	1,136667
	2	2,3	1,19	
	3	2,5	1,29	
C_5/F_0,2	1	2,7	1,38	1,346667
	2	2,4	1,23	
	3	2,8	1,43	
C_5/F_0,4	1	2,7	1,38	1,446667
	2	2,7	1,38	
	3	3,1	1,58	
C_5/F_0,6	1	3	1,53	1,69
	2	3,8	1,96	
	3	3,1	1,58	
C_5/F_0,8	1	2,7	1,38	1,673333
	2	3,7	1,89	

	3	3,4	1,75	
C_5/F_1	1	4,4	2,23	2,203333
	2	4,5	2,29	
	3	4,1	2,09	
C_7/F_0	1	2,3	1,17	1,256667
	2	2,2	1,12	
	3	2,9	1,48	
C_7/F_0,2	1	2,7	1,38	1,43
	2	2,8	1,4	
	3	3	1,51	
C_7/F_0,4	1	3	1,51	1,686667
	2	3,1	1,56	
	3	3,9	1,99	
C_7/F_0,6	1	3,4	1,75	1,71
	2	3,3	1,69	
	3	3,3	1,69	
C_7/F_0,8	1	3,5	1,79	1,906667
	2	4,1	2	
	3	3,8	1,93	
C_7/F_1	1	4,2	2,13	1,93
	2	3,8	1,96	
	3	3,3	1,7	
C_9/F_0	1	2,5	1,28	1,333333
	2	2,7	1,38	
	3	2,6	1,34	
C_9/F_0,2	1	2,9	1,49	1,426667
	2	2,4	1,23	
	3	3,1	1,56	
C_9/F_0,4	1	3,6	1,83	1,5
	2	2,8	1,4	
	3	2,5	1,27	
C_9/F_0,6	1	3,6	1,83	1,616667
	2	2,6	1,34	
	3	3,3	1,68	
C_9/F_0,8	1	5	2,55	2,98
	2	6,2	3,18	
	3	6,3	3,21	
C_9/F_1	1	8,2	4,18	4,016667
	2	7,1	3,62	
	3	8,3	4,25	

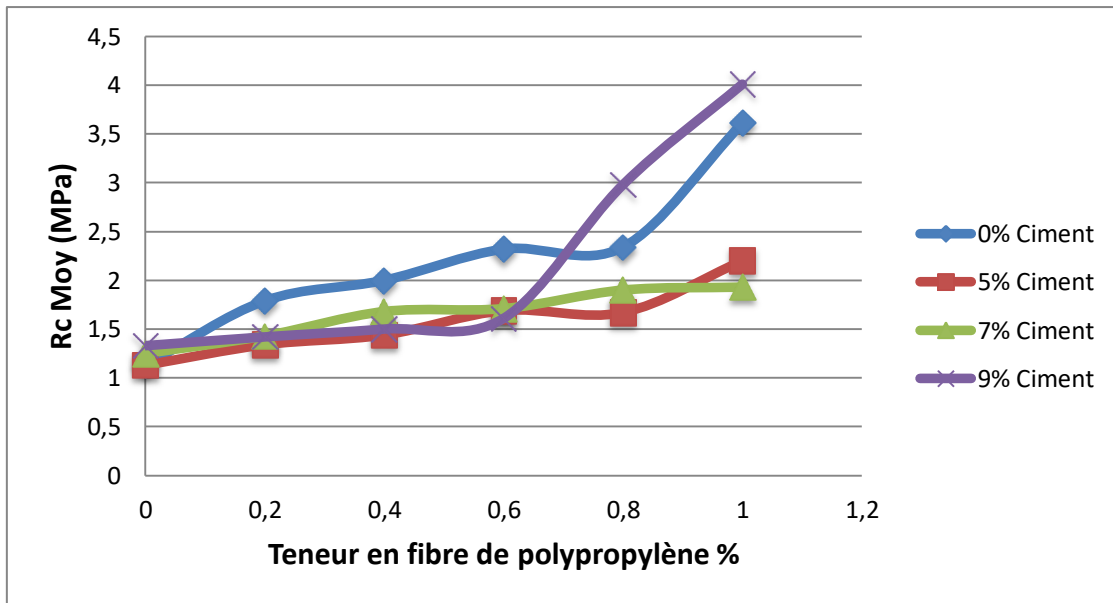


Figure IV.11. Effet des fibres de polypropylène et le dosage de ciment sur la résistance en compression.

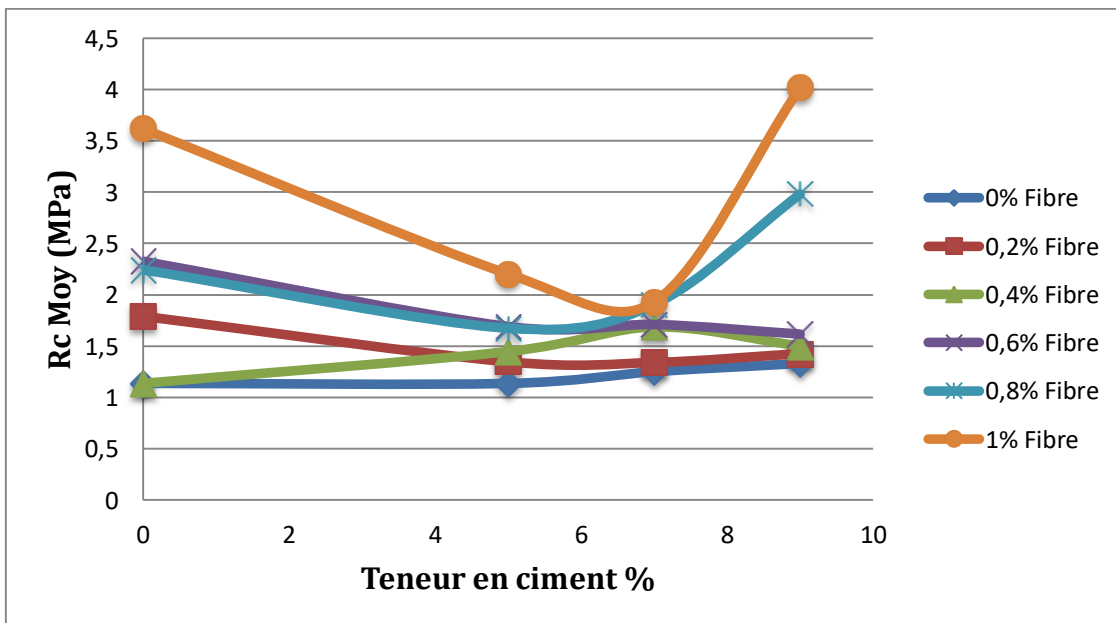


Figure IV.12. Effet du dosage de ciment et des fibres de polypropylène sur la résistance en compression.

IV.5 Interprétation des résultats

IV.5.1 Essais sur sol naturel

Pour bien quantifier l'effet de l'incorporation des fibres de polypropylène et du traitement chimique avec le ciment sur les propriétés du sol de Chaaba el Hamra, une campagne d'essais a été effectuée sur le sol de Chaaba el Hamra afin de caractériser ses propriétés géotechniques. Des éprouvettes de sols naturels ont été confectionnées et les propriétés géotechniques ont été plus tard évaluées à titres indicatifs. Les principaux résultats obtenus sur les éprouvettes de référence sont citées ci-après :

- La teneur en eau à l'optimum Proctor normal $W_{opt} = 16,40\%$.
- La masse volumique sèche maximale $\rho_{dmax} = 1,775\text{g/cm}^3$.
- le degré de saturation à l'optimum $S_r = 59.318\%$.
- L'indice CBR immédiat $I_{CBR} = 6,034 \%$.

IV.5.2. Effet des fibres de polypropylène sur le sol

Afin de visualiser l'effet de l'ajout des fibres de polypropylène sur la portance du sol l'essai CBR immédiat était réalisé. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau IV.3 et les Figure IV.2. Ces résultats montrent que l'incorporation de fibres de polypropylène améliore le comportement du sol vis à vis du poinçonnement. En comparaison avec le sol naturel, le sol renforcé de fibres résiste mieux aux efforts de poinçonnements appliqués.

Il est important de signaler que le meilleur comportement a été enregistré par le sol contenant 0,8% de fibres pour l'essai CBR immédiat. A titre d'exemple, l'indice CBR immédiat varie de 4,34 % à 19,47% lorsque le sol contient 0,8% de fibres, ce qui représente 15,13% d'amélioration.

Il est important de signaler que pendant les essais de compression que les éprouvettes renforcées de fibres restent intacts après l'écrasement, ce qui permet de dire que les fibres réduit la cinétique de développement des fissures et d'apporter plus de ductilité au comportement du sol.

D'après les résultats de l'essai de compression réalisés sur les éprouvettes du sol naturel et ceux renforcés en fibres, il est clair que les l'existence des fibres de polypropylène améliore la résistance à la compression. Les éprouvettes cotonnant les fibres résistent mieux à la compression que l'éprouvette de sol naturel. Cependant, les meilleures performances sont données par l'éprouvette contenant 1% de fibres de polypropylène.

IV.5.3. Effet des fibres de polypropylène et du traitement chimique sur le sol

En plus du renforcement mécanique par les fibres de polypropylène, cette étude expérimentale visualise l'effet du traitement chimique du sol par un liant hydraulique. Afin de quantifier du traitement combiné sur la portance du sol, l'essai CBR immédiat était réalisé suivant le mode opératoire de norme en vigueur.

Les résultats obtenus sont présentés dans les Tableaux IV.8-10 et les Figures IV.7-9. Ces résultats montrent que la réponse donnée par l'essai CBR immédiat montre une tendance de diminution de la portance du sol traité avec l'augmentation du dosage en ciment, pour une teneur en fibre donnée. Ce comportement peut être expliqué par la quantité d'eau dans laquelle se trouve le sol. Pour l'essai CBR immédiat le sol est humide et la quantité d'eau est insuffisante pour assurer l'hydratation complète du ciment, d'une part, et du temps insuffisant pour terminer toutes les produits d'hydratation, d'autre part. Cependant, les meilleures performances ont été observées par les sols traités par 9% de ciment et contenant 0,8% de fibres, respectivement. A titre d'exemple, l'indice CBR immédiat varie de 9,81% à 13,57% pour le sol traité au ciment et renforcé avec des fibres ce qui représente 3,76% d'amélioration. Les résultats de l'essai de compression réalisé sur des éprouvettes humides en fonction de la teneur en fibres et du dosage en ciment sont présentés dans le Tableau IV.11 et les Figures IV.10 - IV.11. Il est clair qu'une tendance de diminution de la résistance avec l'augmentation du dosage en ciment. Pour un dosage de ciment donné, l'ajout des fibres améliore sensiblement la résistance en comparaison du sol naturel. Toutefois, les meilleures performances sont données par les éprouvettes contenant 1% de fibres de polypropylène.

CONCLUSION GENERALE

Le renforcement des sols par des éléments discrets ou des fibres est une solution fréquemment utilisée en géotechnique. Dans la présente étude, la potentialité d'améliorer les propriétés mécaniques d'un sol argileux par des fibres de polypropylène a été expérimentalement analysée. La stratégie suivie consiste en l'étude de l'effet de l'incorporation des fibres de polypropylène sur le comportement d'une argile prélevée 15 km de la ville de M'Sila (sol de Chaaba el Hamra). Les fibres ont été ajoutées en différents pourcentages: 0 ; 0,2 ; 0,4; 0,6 ; 0,8 et 1%, par rapport à la masse totale du sol. En plus du renforcement mécanique du sol, l'étude traite l'effet de l'utilisation du ciment comme agent de traitement chimique avec 5%, 7% et 9% comme dosage.

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 la prise en charge d'une partie du chargement appliqué, ce qui permet de rendre les fibres sollicitées en traction et conséquemment d'améliorer la résistance du sol. Par ailleurs, les fibres réduisent la cinétique de développement des fissures, ce qui permet d'apporter plus de ductilité au comportement de sol. Les principales conclusions du travail effectué peuvent se résumer comme suit:

- ✓ L'ajout des fibres de polypropylène améliore le comportement du sol vis à vis du poinçonnement immédiat du sol.
- ✓ Le renforcement du sol par les fibres de polypropylène améliore la résistance en compression par 220%.
- ✓ Le traitement combiné chimique-mécanique améliore sensiblement la portance des sols renforcés de fibres.
- ✓ L'effet du ciment sur le comportement du sol renforcé n'a pas complètement quantifié puisque le sol se trouve à l'état humide ce qui affecte le processus d'hydratation du ciment.

Toutefois, l'incorporation des fibres de polypropylène dans le sol de Chaaba el Hamra a conduit à l'amélioration de ses propriétés mécaniques. Cependant, la teneur en fibres optimale est celle de 1% en compression et 0,8% au poinçonnement.

*Références
Bibliographique*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Amélioration et renforcement des sols - F. Schlosser - Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), Paris, France
- [2] AFNOR (1995) Renforcement des sols - Ouvrages en sols rapportés renforcés par armatures ou nappes peu éternelles et souples- dimensionnement, NF P 94 220, 49 pages.
- [3] Traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de formes. : Guide technique. – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) ; SETRA, 2000. – 246 p.
- [4] Département Ingénierie « Traitement des sols à la chaux ou au ciment », Librairie des Haras nationaux, Novembre 2004
- [5] AFNOR (1999) Norme Française : NF P 94-093 : Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.
- [6] AFNOR (1997) Norme Française : NF P 94-078 : Sols : Indice CBR immédiat—
Indice CBR après immersion — Indice Portant Immédiat.
- [7] BOULIFA Ridha, « comportement d'éléments structuraux en béton armé au cisaillement : recherche de critères de rupture en relation avec le développement d'un essai approprié », Thèse de doctorat en sciences, Université de Constantine 1, janvier 2014.
- [8] CHIKHI Kamra, « Etude expérimentale des matériaux non saturés au cisaillement et l'oedomètre », Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [9] TAALLAH Bachir, « Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres », Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2014
- [10] MEDDAH& MERZOUG (2016), Article.

Site Internet :

<https://www.encyclopedie-environnement.org/>

<http://www.civil-usherbrooke-ca>

<http://www.wikiTP.fr>

<https://www.keller-france.com/>

<http://doc.lerm.fr/>

<http://www.researchgate.com>

<https://www.memoireonline.com/>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

www.techniques-ingenieur.fr

www.wordpress.fr

www.solsmesures.fr

Normes d'essais :

AFNOR (1996) Norme Française : NF P 94-041 : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide.

AFNOR (1992) Norme Française : NF P 94-057 : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie.

AFNOR (1993) Norme Française : NF P 94-051 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.

AFNOR (1993) Norme Française : NF P 94-068 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche.

Annexes

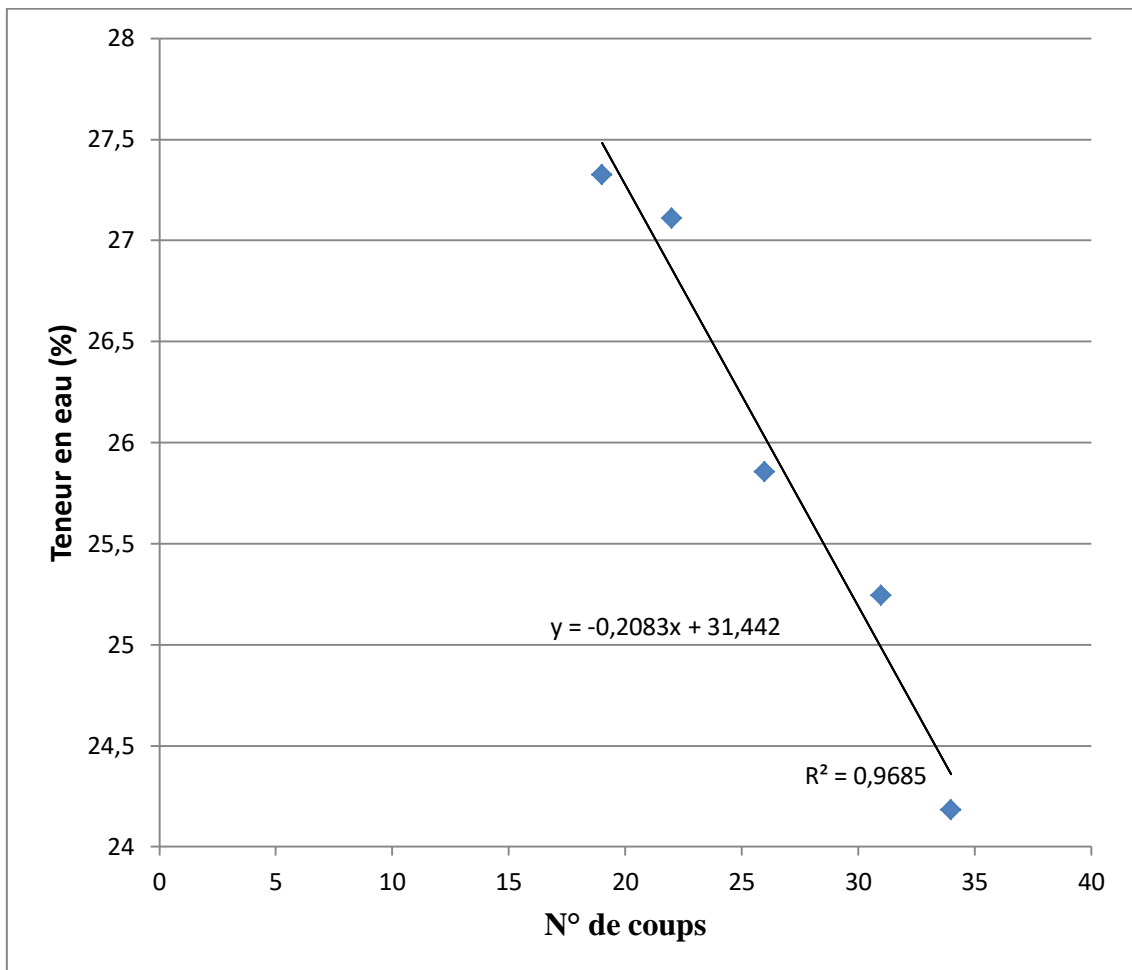
ANNEXES

A.1. Tableau de résultats de limite de liquidité W_L

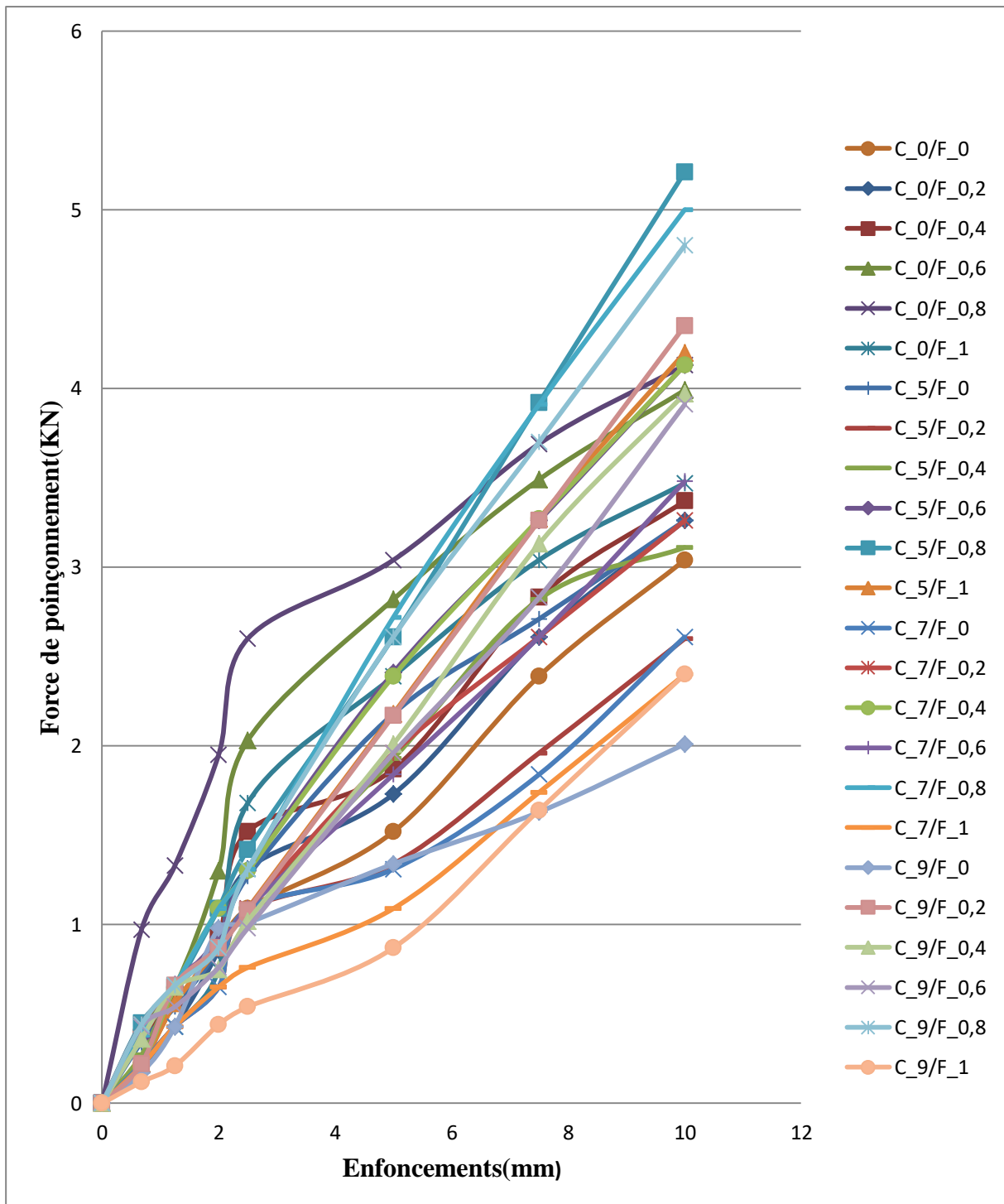
Essai Chaaba	LIMITE DE LIQUIDITE (W_L)									
	1ere Essai		2eme Essai		3eme Essai		4eme Essai		5eme Essai	
tare+sol humide $M_1(g)$	25,7	25,22	17,03	17,15	24,63	24,53	22,58	25,12	41,97	33,65
tare+sol sec $M_2(g)$	23,05	22,75	15,23	15,32	22,39	22,3	20,2	22,81	39,88	31,22
Masse d'eau $M_w=M_2-M_1$	2,65	2,47	1,8	1,83	2,24	2,23	2,38	2,31	2,09	2,43
Tare $M_0(g)$	13,7	13,71	8,6	8,56	13,69	13,71	10,78	13,65	31,29	21,11
Masse de sol sec $M_S=M_2-M_0$	9,35	9,04	6,63	6,76	8,7	8,59	9,42	9,16	8,59	10,11
teneur en eau $w=(M_w/M_s)*100$	28,34	27,32	27,14	27,07	25,74	25,96	25,26	25,21	24,33	24,03
0	2246	30088	93213	10059	71264	04191	53928	83406	0617	56083
Nombre de coups N	19		22		26		31		34	
Moyenne (%)	27,32300885		27,11016359		25,85377276		25,2418667		24,18311265	
$W_L = 26$										

A.2. Tableau de résultats de limite de plasticité W_p

Essai Chaaba	LIMITE DE PLASTICITE (W_p)		
	1ere Essai	2eme Essai	3eme Essai
Tare +Sol humide $M_1(g)$	10,77	29,13	10,92
Tare +Sol sec $M_2(g)$	10,47	28,83	10,62
Masse d'eau $M_w=M_2-M_1$	0,3	0,3	0,3
Tare $M_0(g)$	8,7	27,28	8,92
Masse de sol sec $M_S=M_2-M_0$	1,77	1,55	1,7
Teneur en eau $W= (M_w/M_s)*100$	16,9491525	19,3548387	17,6470588
Moyenne (%)	17,98368336		
$W_p = 18$			



A.3. Courbe de limite de liquidité WL en fonction de nombre de coups



A.4. Courbes des forces de pénétration en fonction de l'enfoncement pour différents dosages en ciment/fibre (C.B.R immédiat).

A.5.Differents photos des essais



ANNEXES



ANNEXES



ANNEXES



ANNEXES



ANNEXES



ANNEXES

