

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**Faculté de technologie**

**Département de Génie civil**



**Domaine : science technologie**

**Filière : GENIE CIVIL**

**Option : GEOTECHNIQUE**

**Mémoire présente pour l'obtention**

**Du diplôme de master académique**

**Par : CHAA Khalissa**

**Intitulé**

**Etude de l'effet des fibres de polypropylène sur les  
caractéristiques de déformabilité d'une argile stabilisée**

**Soutenu devant le jury composé de :**

	<b>Université de M'sila</b>	<b>Président</b>
<b>Mr. MEDDAH Abdelaziz M.C.A</b>	<b>Université de M'sila</b>	<b>Encadreur</b>
	<b>Université de M'sila</b>	<b>Examineur</b>

**Année universitaire : 2019/2020**

# REMERCIEMENTS

*Il est primordial de remercier « ALLAH EL KARIM » de nous avoir donné le  
Courage, la patience et la santé qui nous ont été utiles tout au long de notre  
parcours pour réaliser ce modeste travail.*

*Je voudrais tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur Dr.  
MEDDAH Abdelaziz*

*Je tiens à remercier aussi et à exprimer toute ma gratitude au Abd Elmalik GOUFI  
, avec qui j'ai placé ma confiance dans le développement de ce travail*

*Je remercier tous mes professeurs.*

*J'exprime également mes remerciements à Mr. Malek CHAKI, Directeur du  
laboratoire LCTP de la wilaya de M'sila pour m'avoir accepté au sein de ses  
laboratoires et son aide précieuse et sa compréhension durant toute la période de la  
préparation de ma thèse, et à tous les ingénieurs et les techniciens pour leurs aides et  
compréhensions.*

*Merci pour tous ce qui ont collaboré de près ou de loin pour me faciliter la tâche afin  
Que je puisse achever mon travail de recherche.*

## DEDICACE:

Je dédie ce modeste travail à mes parents pour leurs amours et les sacrifices sans limites qu'ils ont consentis pour que je réussisse tout au long de ces années.

A toute la famille CHAA

A mon frère et mes soeurs qui ont été à côté de moi et qui m'ont encouragés et aidés pour aboutir ce travail.

A mon âme et ma compagne, à la plus gentille sœur au monde qui m'accompagne toujours, hassina

A qui j'ai goûté les plus beaux moments, mon amie Mehia sarah.

A tous mes amis et ceux qui me connaissent de loin ou de près, en particulier mon ami Bitar dalal.

A tous celles-ci je dédie le fruit de ce travail.

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des Tableaux

## **Introduction générale**

### **Chapitre I : Concepts généraux sur les techniques d'amélioration des sols**

<b>I.1. Introduction</b> .....	<b>3</b>
<b>I.2. Les argiles</b> .....	<b>3</b>
I.2.1. Définition.....	3
I.2.2. Minéraux argileux .....	3
<b>I.3. Procèdes d'amélioration des sols</b> .....	<b>5</b>
I.3.1. Renforcement des sols par éléments linéaires résistants (terre armée) [1].....	6
I.3.3. Stabilisation chimique des sols.....	7
I.3.3.1. Traitement par chaux [5].....	7
I.3.3.2. Traitement par ciment .....	9
<b>I.4. Conclusion</b> .....	<b>10</b>

### **Chapitre II : Généralités sur l'utilisation des fibres en Génie Civil**

<b>II.1. Introduction</b> .....	<b>11</b>
<b>II.2. Type de Fibres</b> .....	<b>11</b>
II.2.1. Fibres synthétiques.....	11
II.2.2. Fibres végétales .....	14
<b>II.3. Fibres de polypropylène</b> .....	<b>15</b>
<b>II.4. Utilisation des fibres en Génie Civil</b> .....	<b>16</b>

II.4.1. Stabilisation des sols .....	16
II.4.2. Renforcement du béton.....	17
<b>II.5. Conclusion .....</b>	<b>17</b>

### **Chapitre III : Matériaux et procédure expérimentale**

<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>19</b>
<b>III.2. Matériaux utilisés.....</b>	<b>19</b>
III.2.1. Sol utilisé .....	19
III.2.2. La chaux.....	20
III.2.3. Sable .....	22
III.2.4. Fibres .....	22
<b>III.3. Méthodes expérimentales .....</b>	<b>23</b>
III.3.1. Détermination des caractéristiques de compactage .....	23
III.3.2. Résistance en compression .....	24
III.3.3. Consolidation.....	24
III.3.4. Teneur en chaux ( Eades and Grim ) .....	26
<b>III.4. Protocole expérimental.....</b>	<b>27</b>

### **Chapitre III : Matériaux et procédure expérimentale**

<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>19</b>
<b>III.2. Matériaux utilisés.....</b>	<b>19</b>
III.2.1. Sol utilisé .....	19
III.2.2. La chaux.....	20
III.2.3. Sable .....	22
III.2.4. Fibres .....	22
<b>III.3. Méthodes expérimentales .....</b>	<b>23</b>
III.3.1. Détermination des caractéristiques de compactage .....	23

III.3.2. Résistance en compression .....	24
III.3.3. Consolidation.....	24
III.3.4. Teneur en chaux ( Eades and Grim ) .....	26
<b>III.4. Protocole expérimental.....</b>	<b>27</b>

## **Chapitre VI : Résultats et interprétation**

<b>VI.1. Introduction.....</b>	<b>29</b>
<b>VI.2. Caractéristiques de compactage .....</b>	<b>29</b>
<b>VI.3. Optimisation du pourcentage de la chaux (Essai Eades and Grim ) .....</b>	<b>31</b>
<b>VI.4. Résistance à la compression .....</b>	<b>32</b>
<b>VI.5. Essais œdométriques.....</b>	<b>35</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>37</b>
<b>Référnces bibliogrphique.....</b>	<b>39</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>40</b>

## Liste des figures

<b>Figure I .1</b> : Eléments structurels de base des particules d'argile	
a) Le tétraèdre, b) feuillet tétraédrique, c) octaèdre d'aluminium, d) octaèdre.....	4
<b>Figure I .2</b> : schéma de principe de terre armée .....	6
<b>Figure I .3</b> : Traitement des sols a la chaux .....	9
<b>Figure I .4</b> : Traitement des sols au Ciment .....	10
<b>Figure II.1</b> : Microfibres synthétiques .....	12
<b>Figure II.2</b> : Macrofibres synthétiques.....	12
<b>Figure II.3</b> : Fibres de polypropylène .....	15
<b>Figure II.4</b> : Principe du fonctionnement des fibres dans le béton .....	17
<b>Figure III.1</b> : Aspect du sol de Sidi Hadjres a) intact, b) broyé .....	19
<b>Figure III.2</b> : Format commercialisé de la chaux employée. ....	21
<b>Figure III.4</b> : L'essai de compression. ....	24
<b>Figure III.5</b> : Modèle de consolidation .....	25
<b>Figure III.6</b> : Ph-mètre.....	26
<b>Figure III.7</b> : Procédure expérimentale suivie .....	28
<b>Figure VI.1</b> : Variation des caractéristiques de compactage en fonction du sable ajouté.....	30
<b>Figure VI.3</b> : Variation de la résistance en la compression à 28 jours .....	34
<b>Figure VI.2</b> : Courbe de PH.....	34
<b>Figure VI.4</b> : Influence des stabilisants sur la Rc avec le temp de cure .....	35
<b>Figure VI.5</b> : courbes œdométriques obtenus .....	36

## Liste des Tableaux

<b>Tableau II.1</b> : Propriétés des fibres synthétiques [ACI 544-1R] .....	13
<b>Tableau II.2</b> : caractéristiques physiques de fibres végétales les plus utilisées. ....	14
<b>Tableau II.3</b> : Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres .....	14
<b>Tableau II.4</b> : caractéristiques techniques des fibres de polypropylène .....	16
<b>Tableau II. 5</b> : domaines d'utilisation du béton de fibres (CHERGUI, 2010), tiré de Benouadah 2019 .....	17
<b>Tableau III.1</b> : Caractéristiques géotechniques du sol étudié. ....	20
<b>Tableau III.2</b> : Propriétés physiques et chimiques de la chaux de Saida [Fiche technique]. ...	21
<b>Tableau III.3</b> : Caractéristiques géotechniques du sable étudié.....	22
<b>Tableau III.4</b> : Propriétés techniques de la fibre utilisée [fiche technique] .....	22
<b>Tableau III.5</b> : Programme d'essai exécuté.....	27
<b>Tableau VI.1</b> : Caractéristiques de compactage Proctor .....	29
<b>Tableau VI.2</b> : Optimisation de la quantité de chaux ( Eades and Grim ).....	32
<b>Tableau VI.3</b> : Résultats de la résistance à la compression. ....	33
<b>Tableau VI.4</b> : Effet des fibres PP sur les indices de compression et de gonflement.....	35

**INTRODUCTION  
GENERALE**

# INTRODUCTION GENERALE

---

## 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 remblais consiste en l'amélioration de la capacité de supporter les différents types de charges (permanentes, d'exploitations ou celles dues à l'eau). En géotechnique, plusieurs techniques sont utilisées pour améliorer les sols. Elles sont basées parfois sur un processus purement chimique (addition de ciment, chaux, cendres volantes, laitier...) ou à travers une approche mécanique (incorporation des éléments ou renforts relativement rigides).

Cependant, le choix entre ces méthodes dépend du type de sol à traiter, la nature du projet, l'intensité et le type du chargement appliqué, des moyens disponibles et dans certains cas des raisons liées à l'environnement. Conventionnellement, le premier type de techniques est généralement considéré comme stabilisation alors que le second un renforcement.

Le renforcement des sols peut être principalement réalisé en utilisant des éléments géosynthétiques continus ou en acier préalablement orientés ou en utilisant des éléments courts et discrets aléatoirement distribués (fibres). Dans la première technique, la résistance augmente autour du renforcement, ce qui favorise l'apparition de plans de cisaillement au niveau des inclusions et en conséquence affecte la stabilité locale et/ou globale de l'ouvrage, en particulier lorsqu'il existe plusieurs couches de renforcements continus. Cependant, dans le second cas, les fibres distribuées aléatoirement réduisent la formation de plans de faible résistance, ce qui pourrait augmenter l'aspect sécuritaire du sol renforcé.

Le renforcement des sols par des fibres courtes a été de plus en plus étudié par les chercheurs, tant en théorie qu'en pratique, en raison de ses avantages. Il a été rapporté dans la littérature que l'utilisation des fibres aléatoirement distribuées, par rapport aux renforcements linéiques, présente plusieurs avantages, notamment les fibres peuvent être simplement ajoutées et mélangées avec le sol de manière semblable à celle du cas de ciment, chaux ou autres additifs. En plus, ce procédé de renforcement limite l'apparition de plans de faiblesse et fournit une augmentation isotrope de la résistance du composite (sol fibreux).

## INTRODUCTION GENERALE

---

Les fibres peuvent être distinguées principalement par son matériau constitutif, en effet il existe des fibres en polypropylène, naturelles (végétales), en caoutchouc, de verre, etc. Ces fibres pouvaient être utilisées pour stabiliser les sols aussi bien cohérents que pulvérulents.

Cette étude a pour but d'améliorer les propriétés géotechniques d'une argile collectée de la zone West de la ville de M'sila, dite localement argile de Sidi Hadjres. Ce sol est très connu par son aspect très plastique ainsi que son caractère gonflant très élevé. En pratique, les ingénieurs praticiens de plus en plus se familiarisent avec ce sol, sur tout avec l'existence d'une expérience assez importante (rapports des sols, travaux de recherche, cas pathologiques, règles de constructions sur sols gonflants et surtout l'expérience des ingénieurs).

Cependant, les travaux de recherches précédents, réalisés sur ce sol, ont traités la problématique de ce sol principalement avec une approche purement chimique (stabilisation avec et du ciment et/ou de la chaux). Cependant, cette étude vise à étudier la possibilité de stabiliser cette argile avec un traitement combiné (chimique et mécanique). Trois agents de traitement ont été utilisés, le sable, la chaux et les fibres de polypropylène (PP). Le protocole expérimental suivi consiste en l'étude de l'effet de ces additifs sur différents aspects du comportement de ce sol (compactage, résistance, déformabilité). Les fibres de polypropylène ont été ajoutées en différents pourcentages 0,3 ; 0,6 ; 0,9 et 1,2%.

Le manuscrit est composé des chapitres suivants :

- Introduction générale
- Chapitre I :
- Chapitre II :
- Chapitre III :
- Chapitre VI :
- Conclusions générales

**Chapitre I :**  
**Concepts généraux**  
**sur les techniques**  
**d'amélioration des**  
**sols**

## I.1. Introduction

En Génie civil, la nécessité d'utiliser des terrains pour les constructions de plus en plus n'a fait que croître au cours des dernières décennies. Dans ce contexte, les ingénieurs sont parfois obligés d'entamer des projets d'amélioration et/ou renforcement des sols médiocres (de faible portance).

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 ou stabilisation 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.

Cependant, 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.

## I.2. Les argiles

### I.2.1. Définition

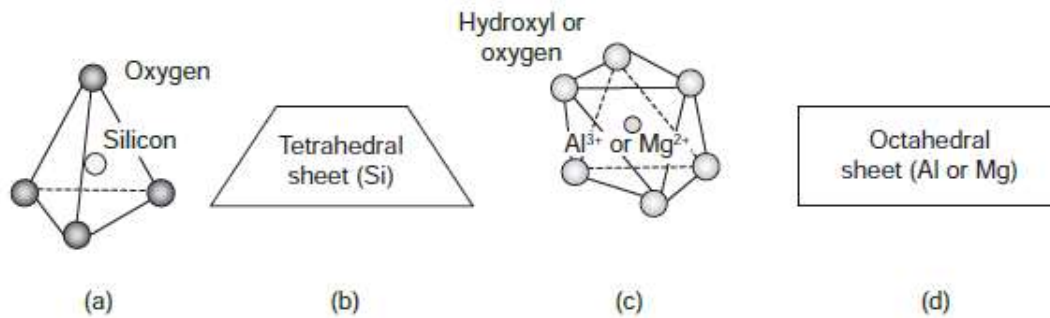
Les argiles sont des sols particuliers très fins ( $< 2 \mu\text{m}$ ) résultent de la désintégration physique ou mécanique des roches suivie d'une transformation chimique. Elles sont très sensibles à la présence d'eau et de leur structure élémentaire cristalline. Ces sols sont cohésifs, compressibles, très difficiles à manipuler et à compacter et parfois gonflants. Ils sont très peu perméables, ce qui rend la variation de leur teneur en eau très lente.

### I.2.2. Minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des phyllosilicates d'aluminium hydratés se présentant sous la forme de feuillets. La structure atomique des argiles est composée de deux éléments structurels de base (Fig. 1) :

- Le tétraèdre de silice  $\text{SiO}_4$
- L'octaèdre d'aluminium  $\text{Al}_2(\text{OH})_6$  ou de magnésium  $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$

Lorsque plusieurs ces éléments sont assemblés entre eux, ils créent des feuillets élémentaires tétraédriques et octaédriques reliés entre eux par des liaisons covalentes. Pour des raisons de visualisation, ces feuillets sont représentés par un rectangle pour le feuillet octaédrique et un trapèze pour le feuillet tétraédrique (Fig. 2).



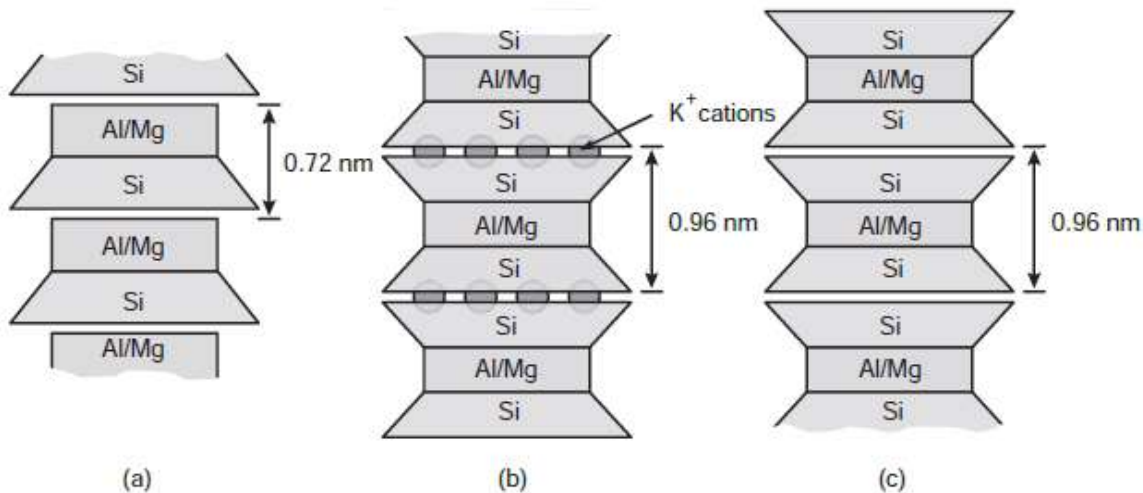
**Figure I.1 :** Eléments structurels de base des particules d'argile.

a) Le tétraèdre, b) feuillet tétraédrique, c) octaèdre d'aluminium, d) octaèdre

Différents minéraux argileux sont produits par l'assemblage des feuillets élémentaires en différentes combinaisons. Les types d'argiles les plus connues en géotechnique la kaolinite, l'illite, et la montmorillonite.

- La kaolinite est formée en empilant plusieurs couches de feuilles tétraédriques et octaédriques alternées, chacune d'une épaisseur de 0,72 nm, empilées les unes sur les autres (figure 3.6a) Ils sont maintenus ensemble par de fortes liaisons hydrogène qui les empêchent de se séparer. La kaolinite est utilisée dans la céramique, le papier, la peinture et la médecine.
- Illite est formée en empilant plusieurs couches de 0,96 nm d'épaisseur constituées d'une feuille octaédrique prise en sandwich entre deux tétraédriques feuilles (une inversée) comme le montre la figure 3.6b. Ils sont maintenus ensemble par des ions potassium, où les liaisons ne sont pas aussi fortes que dans la kaolinite.
- Montmorillonites (figure 3.6c), également appelées smectites, ont la même structure atomique que l'illite, mais les couches sont maintenues ensemble par un van der faible Waals force. Lorsque l'eau pénètre entre les couches, elles sont facilement séparées et il y

aura une augmentation substantielle du volume, connue sous le nom de gonflement. Les argiles de type montmorillonite sont appelées expansives ou des argiles réactives. Ils se dilatent en présence d'eau et rétrécissent lorsqu'ils sont séchés.



### I.3. Procèdes d'amélioration des sols

En chantier les sols de fondations ne sont pas toujours aptes de supporter les charges venant des structures (bâtiments, routes, barrages, etc). A titre d'exemple, un sol granulaire et lâche peut avoir des tassements importants sous l'effet des charges qui sont appliquées. Dans cette situation, la résistance au cisaillement et les tassements peuvent être améliorées par un compactage statique ou dynamique selon la profondeur de la couche.

Dans certaines mesures les couches de faible portance sont souvent rencontrées sous les fondations. En fonction de l'intensité de la charge appliquée et de la profondeur de la couche, le sol peut subir des déformations importantes. En effet, des techniques spéciales d'amélioration des sols sont nécessaires pour réduire les tassements, telles que le compactage (statique et dynamique), les colonnes ballastées, la terre armée, l'ajout des fibres, le drainage, la stabilisation chimique etc. Le choix entre ces méthodes dépend du type de sol à améliorer, la profondeur souhaitée, l'importance du projet et des moyens disponibles.

En pratique les propriétés géotechniques des sols fins pouvaient être modifiées essentiellement par l'ajout des agents stabilisants tels que la chaux et le ciment. L'amélioration des sols à travers un procédé chimique est dite conventionnellement stabilisation.

Les méthodes de renforcement/amélioration des sols ont pour objectif de :

- Réduire les tassements de structures
- Améliorer la résistance au cisaillement et par conséquent la capacité portante des sols de fondations
- Augmenter l'aspect sécurité dans les zones proches de surfaces probables de rupture de talus et de digues
- Réduire la déformation dimensionnelle des sols de retrait ou de gonflement pour sols fins

### I.3.1. Renforcement des sols par éléments linéaires résistants (terre armée) [1]

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 .2 : schéma de principe de terre armée

### **I.3.2. Renforcement des sols par éléments discrets ou fibres [2,3,4]**

Le renforcement des sols consiste, dans son principe, à associer un sol à des éléments résistants de manière à former un matériau composite. Le renforcement des sols regroupe un ensemble de techniques consistant à améliorer la résistance initiale du sol par l'inclusion d'éléments résistants prés-orientés, ou en utilisant des fibres discrètes aléatoirement distribuées. Dans la première technique, la résistance à la traction au cisaillement dans les sols entourant l'armature augmente, ce qui favorise l'apparition de plans de cisaillement au niveau des inclusions et affecte la stabilité locale et globale des ouvrages, en particulier lorsqu'il existe plusieurs couches d'armatures continues. Cependant, dans le deuxième cas, les fibres distribuées de façon aléatoire réduisent la formation de plans faibles, ce qui pourrait augmenter la stabilité à long terme des ouvrages en terre renforcée. Le renforcement des sols renforcés par fibres a été de plus en plus étudié par les chercheurs en géotechnique tant sur le plan théorique qu'expérimental en raison de ses avantages. L'utilisation de fibres distribuées de manière aléatoire comme renforts présente plusieurs avantages par rapport aux géo synthétiques linéaires, notamment: des fibres discrètes peuvent être simplement ajoutées et mélangées avec du sol, de la même manière que le ciment, la chaux et d'autres additifs; les fibres distribuées de façon aléatoire peuvent limiter les plans de faiblesse potentiels qui peuvent se développer parallèlement au renforcement orienté conventionnel et fournir une augmentation isotrope de la résistance du composite de sol. Les fibres réparties aléatoirement peuvent être distinguées par leur matériau, en effet, de nombreux types de fibres sont.

### **I.3.3. Stabilisation 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.

### I.3.3.1. Traitement par chaux [5]

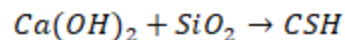
La chaux se trouve sous plusieurs formes, oxyde de calcium CaO, hydroxyde de calcium Ca (OH)<sub>2</sub>, chaux dolomitique (magnésienne) CaO.MgO, chaux dolomite monohydrate Ca(OH)<sub>2</sub>.MgO. Le dosage en chaux varie en fonction des sols et des résultats recherchés généralement compris entre 5 et 10%.

Les sols fins à teneur élevées en argiles ou limons présentent une faible résistance vis-à-vis des sollicitations d'ordre climatique : ils gonflent en présence d'eau, se rétractent par sécheresse. Le traitement à la chaux est recommandé pour les sols dont la teneur en argile est supérieure à 40%.

Une fois la chaux est ajoutée aux sols fins, elle modifie sensiblement son comportement. En effet la chaux :

- Réduit la teneur en eau dans le sol par l'action combinée de trois phénomènes, l'apport de matières sèches, la consommation d'eau durant l'hydratation et par évaporation
- Change l'aspect physique du sol d'un état plastique à un état solide et réduit sa sensibilité à l'eau.
- Agglomère les particules fines donnant des particules plus grossières et friables
- Modifie les caractéristiques de compactage ; par diminution de la densité sèche maximale et augmentation de la teneur en eau optimale
- Améliore la portance du sol ; par augmentation de l'indice de portance immédiat

A long terme des réactions pouzzoloniques se produites en milieu fortement basique. La chaux réagit avec les composants du sol (la silice et alumine) pour donner des silicates et des aluminates cristallisés. A titre d'exemple :



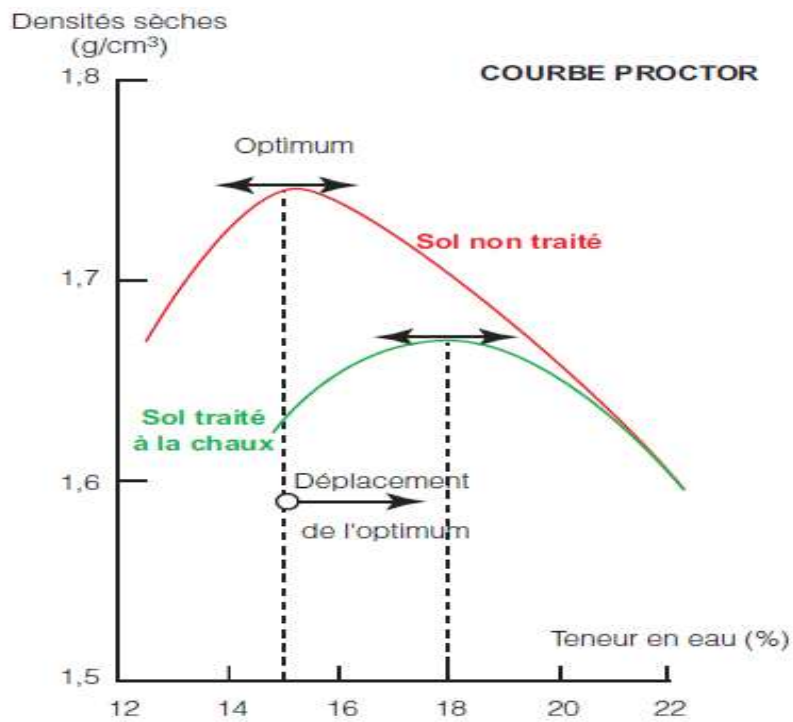
Où :

C=CaO

S=SiO<sub>2</sub>

$$H = H_2O$$

**CSH** : Silicates d'argile ou silicates de calcium hydratés. Il est à noter que plusieurs facteurs peuvent affecter l'intensité et la vitesse de réactions pouzzoloaniques, tels que PH, teneur en matières organiques, quantité et la nature de la fraction argileuse, teneur en eau, dosage en chaux et température



**Figure I .3** : Traitement des sols a 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.



**Figure I .4 :** Traitement des sols au Ciment

## I.4. Conclusion

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.

**Chapitre II :  
Généralités sur  
l'utilisation des  
fibres en Gène  
Civil**

## II.1. Introduction

Les fibres avec leurs variétés comme (caoutchouteuses, verre, métalliques, polypropylène) sont devenues très fréquentes en Génie Civil. Elles sont utilisées principalement comme renforts pour les matériaux de construction et stabilisants pour les sols.

L'expérience montre que l'utilisation des fibres en 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, résistance en traction et également et capacité d'absorption des chocs. Dans ce chapitre on présente une brève description sur l'utilisation des fibres en Génie Civil.

## II.2. Type de Fibres

### II.2.1. Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques proviennent des polymères organiques. Elles résultent du progrès et du développement considérable de l'industrie pétrochimie et du textile. Les fibres les plus reconnues sont, les polyoléfines, les polypropylènes, les polyéthylènes, le nylon et le carbone.

Les fibres synthétiques s'incorporent à la pâte de ciment sans provoquer de réaction chimique et sans se corroder. De plus, l'allongement à la rupture des fibres synthétiques, qui est de 15 à 20 %, favorise la ductilité du béton.

Les fibres synthétiques tirées des matières plastiques sont, par contre, peu résistantes au feu. La température de fusion ou température à laquelle les fibres deviennent très molles et perdent leurs propriétés est d'environ 160°C.

Les fibres synthétiques peuvent se classer, selon leur dimension, en deux catégories :

➤ **Les microfibrés** : la classification des microfibrés synthétiques s'effectue à partir de la dimension et du poids de la fibre, conformément à l'industrie du textile. Les microfibrés synthétiques sont en forme de monofilament très fin ou fibrillé (figure 2.1), leur longueur varie de 0,8 à 50 mm et leur diamètre est inférieur à 0,2 mm. Elles sont utilisées pour diminuer le retrait plastique du béton. L'amélioration des propriétés mécaniques par l'utilisation de microfibrés est proportionnelle à leur taux d'addition et à leur efficacité. De plus, ces fibres apportent une augmentation de la ténacité du béton et, par le fait même, elles améliorent son comportement en

post fissuration. Pour les sols, l'expérience montre que l'ajout des fibres augmente le frottement entre particules et crée une cohésion supplémentaire, ce qui permet d'améliorer la résistance et par conséquent la capacité portante aussi bien pour les sols grenus que fins.



**Figure II.1 :** Microfibres synthétiques

➤ **Les macrofibres:** ces fibres sont en forme de filaments grossiers (figure 2.2). Leur longueur varie de 25 à 65 mm et leur diamètre équivalent est de 0,2 à 1,2 mm. L'utilisation de ce type de fibres permet une meilleure résistance aux impacts et à la fatigue et améliore le contrôle de la fissuration. Certains types de fibres sont aussi reconnus pour diminuer la fissuration provoquée par le retrait plastique.



**Figure II.2 :** Macrofibres synthétiques

Le tableau II.1 traduit du document de l'ACI 544-1R, présente différents types de fibres synthétiques ainsi que leurs propriétés mécaniques.

**Tableau II.1 : Propriétés des fibres synthétiques [ACI 544-1R]**

Type	Diamètre	Densité	R <sub>t</sub> (MPa)	E (MPa)	ε <sub>r</sub>	T <sub>inf</sub> (c°)	T <sub>fus</sub> (c°)	A <sub>bs</sub> %
Acrylique	5-7	1.16-1.18	200-1000	14000-19000	7.5-50	-	220-235	1.0-2.5
Aramide	12	1.44	2900	62 000	4.4	élevée	480	4.3
Aramide (module élevé)	10	1.44	2340	120 000	2.5	élevée	480	1.2
Carbone	8	1.6-1.7	2480-3030	380000	0.5-0.7	élevée	400	nul
Carbone	9	1.6-1.7	3445-4000	230000	1.0-1.5	élevée	400	nul
Carbone	10-13	1.6-1.7	480-795	27000-35000	2.0-2.4	élevée	400	3-7
Carbone	9-18	1.8-2.15	1515-3100	150000-480000	0.5-1.1	élevée	500	Nul
Nylon	23	1.14	1000	5200	20	-	200-220	2.8-5.0
Polyester	10-80	1.34-1.39	220-1100	17000	12-150	590	255	0.4
Polyéthylène	25-1000	0.92-0.96	80-600	5000	3-80	-	135	nul
polypropylène	20-200	0.90-0.91	140-700	3400-4800	15	590	165	nul

R<sub>t</sub> : Résistance à la traction

E : Module d'élasticité

ε<sub>r</sub> : Pourcentage d'allongement à la rupture

T<sub>inf</sub> : Température d'inflammation

T<sub>fus</sub> : Température de fusion d'oxydation ou de décomposition

A<sub>bs</sub> : Absorption (ASTM D 570)

## II.2.2. Fibres végétales

Les fibres végétales sont des fibres naturelles destinées, comme les autres types de fibres, à améliorer les caractéristiques mécaniques du béton et du sol et à la déformation en s'opposant à sa fragilité. Il existe une grande variété de fibres végétales dont on peut citer, le sisal, la jute, le coir (fibre de coco), bois, bambou et le palmier. Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance. A savoir : les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface. Elles sont utilisées généralement dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du ciment et du béton. [6]. Le Tableau II.2 présente les propriétés physiques des fibres végétales les plus utilisées, reproduit par Kriker [6].

**Tableau II.2 :** caractéristiques physiques de fibres végétales les plus utilisées.

Fibres	Diamètre (mm)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Teneur en eau naturelle (%)	Absorption d'eau après 5min (%)	Absorption d'eau à la saturation (%)
Sisal	0.008-0.3	0.75- 1.07	10.97-14.44	67-92	190-250
Noix de coco	0.11-0.53	0.67- 1.00	11.44-15.85	22-28	85-135

Le tableau II.3 présente les propriétés physique et mécanique de quelques fibres végétales reproduites par Kriker.[6]

**Tableau II.3 :** Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres.

Fibres	Densité g/cm <sup>3</sup>	Allongement à la rupture	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
Cotton	1.5-1.6	7.0-8.0	587-597	5.5-12.6
Jute	1.3	1.5-1.8	393-373	26.5
Line	1.5	2.7-3.2	345-1035	27.6
Chanvre	-	1.6	690	-
Ramie	-	3.6-3.8	400-938	61.4-128

### II.3. Fibres de polypropylène

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfinés. Il est fabriqué depuis 1954 (MIMOUNE 1994) pour l'industrie du textile. Il a connu une extension croissante dans le domaine de la construction où il apporte les avantages suivants : une résistance à la traction qui peut atteindre 800MPa et une déformabilité élevée. Ces fibres sont obtenues suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre des propriétés mécaniques élevées. L'ajout de fibres de polypropylène au mortier et au béton remonte à 1960, mais ce n'est qu'à partir de 1967 qu'apparaissent des réalisations intéressantes notamment en Grande-Bretagne. Elles sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de panneaux décoratifs et l'élaboration de revêtement de façades. Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment. Leur module d'élasticité est plus faible que la pâte durcie. Il convient de les utiliser de préférence pour les pièces minces devant résister, soit aux chocs mécaniques, soit dans les cas où l'acier risque une corrosion sévère.



**Figure II.3 :** Fibres de polypropylène.

Le Tableau II.4 présente les caractéristiques mécaniques et physiques des fibres de polypropylène

Tableau II.4 : caractéristiques techniques des fibres de polypropylène

Fibres	polypropylène
Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	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 ( $\mu\text{m}$ )	90
R Temps Max C°	150

## II.4. Utilisation des fibres en Génie Civil

### II.4.1. Stabilisation des sols

L'utilisation de fibres synthétiques et naturelles dans les projets de stabilisation des sols est devenue de plus en plus une pratique courante en géotechnique notamment pour améliorer les sols en faible profondeur. Cette technique peut être utilisée pour les sols aussi bien pulvérulents que cohérents. En effet, plusieurs recherches récentes ont traité ce sujet dans l'objectif de fournir des solutions alternatives qui permettent de répondre aux exigences techniques, réduire les couts et respecter l'environnement.

Les fibres synthétiques comme le propylène et le caoutchouc sont caractérisés par une haute résistance à la dégradation chimique et biologique ce qui permet d'améliorer la résistance à long terme. L'expérience montre que l'incorporation dès ce type de fibres dans un sol sableux change ses propriétés mécaniques. En effet les fibres renforcent le squelette granulaire par l'augmentation des forces de contact créant ainsi un frottement supplémentaire. Par ailleurs, les fibres ont été utilisées également avec succès pour la stabilisation des sols fins afin de réduire la déformabilité, augmenter la résistance et diminuer la sensibilité à l'eau.

L'expérience montre également que l'addition des fibres réduit légèrement la densité sèche maximale et augmente la teneur en eau optimale. Cependant, l'effet des fibres sur l'optimum est plus remarquable avec les fibres naturelles que synthétiques à cause de l'aspect étanche de ces dernières

II.4.2. Renforcement du béton

L'ajout des fibres aux matériaux cimentaires a pour objet d'améliorer certaines caractéristiques techniques telles que la résistance à la fissuration et la ductilité. Cependant, l'expérience montre que les fibres n'ont pas un grand effet sur la résistance.

Au début, les chercheurs ont pensé a ajouté des fibres dans le béton afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques tel que la résistance a la compression et à la traction.



Figure II.4: Principe du fonctionnement des fibres dans le béton

Tableau II. 5: domaines d'utilisation du béton de fibres (CHERGUI, 2010), tiré de Benouadah 2019.

Application	Intérêts
Canalisation et coque minces faiblement sollicitées.	-Amélioration de la tenue des pièces au jeune âge. -Modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration.
Dallage, chaussées en béton, dallages manufacturés et tous les éléments structuraux soumis à la flexion.	-Diminution de 40% de l'ouverture des fissures. -Augmentation de la rigidité après fissuration. -Augmentation de la résistance au cisaillement. -Augmentation de la résistance à l'usure.
Elément structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations...etc.)	-Amélioration de la charge ultime, -Pas de rupture catastrophique.
Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles exemple : pistes d'aéroports.	-L'énergie absorbée est plus importante, -La durée de choc est augmentée, -La loi de comportement du matériau est fortement modifier.
Réparation des revêtements routiers, tabliers	-Amélioration de la résistance aux chocs,

de ponts.	-Amélioration de la déformation.
Parties exposées aux fortes variations de températures et même aux hautes températures.	-Remplacement avec succès du revêtement réfractaire, -Diminution du cout de réparation des éléments réfractaires.
Stabilisation des parois rocheuses, les talus, les tunnels et les galeries souterraines.	-Evite le travail de fixation des grillages ordinairement employés, -Diminution du cout de réparation de stabilisation des parois rocheuses et les talus.
Fabrications des pieux, revêtement ignifuges isolants (constructions navales). Panneaux de revêtement de façades ... etc.	-Augmentation de la résistance aux chocs, -Augmentation de la résistance à l'usure, -Augmentation de la durabilité des revêtements.

## II.5. 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 améliorer les propriétés techniques des matériaux du Génie et réduire les coûts en comparaison avec les matériaux classiques.

# **Chapitre III : Matériaux et procédure expérimentale**

### III.1. Introduction

L'objectif de ce travail de recherche est de traiter un sol argileux collecté de la région du Hodna. Il s'appuie sur le principe d'utiliser un traitement combiné composé de trois agents le sable, la chaux et les fibres de polypropylène. L'étude consiste à analyser l'effet de ces stabilisants sur les caractéristiques de résistance et déformabilité du sol étudié. Dans ce chapitre les matériaux utilisés, les procédures suivies et le programme expérimental exécuté sont présentées

### III.2. Matériaux utilisés

#### III.2.1. Sol utilisé

Le sol utilisé dans cette étude est prélevé à partir d'un projet en chantier (projet de mosquée) situé à Sidi-Hadjres, 50 km à l'Ouest de la ville de M'sila ( $35^{\circ} 40'30''$  N et  $4^{\circ} 02'16''$  E). La Figure III.1 montre l'aspect du sol étudié à son état naturel (in situ) et après broyage ( $<3,15$ mm). Le sol a été prélevé à partir d'une profondeur d'environ 2m. Après l'extraction, le sol a été placé dans des sacs en plastique puis conservé aux conditions du laboratoire. Les caractéristiques géotechniques du sol sont groupées dans le Tableau III.1. D'après les essais d'identification, le sol est de nature argileuse. De plus, cette argile est considérée comme sol problématique à cause de son aspect très déformable et son caractère très gonflant (selon les classifications qui sont basées sur les caractéristiques de plasticité). De plus, cette argile était l'objet de nombreuses recherches expérimentales visant de son traitement avec d'un processus purement chimique en utilisant principalement de la chaux et/ou du ciment.



**Figure III.1** : Aspect du sol de Sidi Hadjres a) intact, b) broyé

Tableau III.1 : Caractéristiques géotechniques du sol étudié.

	Propriété	Valeur
Caractéristiques de plasticité ASTM D-4318	Limite de liquidité [%]	85.9
	Limite de plasticité [%]	33.9
	Indice de plasticité	52
Caractéristiques physiques ASTM D-831	Masse volumique absolue [g/cm <sup>3</sup> ]	2.7
Caractéristiques granulométriques ASTM D-421 & 422	Gravie (>5 mm) [%]	0
	Sable (5-0.08) [%]	2
		23
	limon (0.08-0.002) [%]	
	Argile (<0.002 mm) [%]	75
Classification	USCS	CH: High plasticity clay (argile très plastique)
Caractéristiques de compactage ASTM D-698	Teneur en eau optimale [%]	24.58
	Densité sèche maximale	1.56
Caractéristiques mécaniques ASTM D-2166	Résistance à la compression [kPa]	256

### III.2.2. La chaux

La chaux est obtenue par cuisson de roches calcaires dans des fours droits ou rotatifs à une température variable de 900 à 1250 °C. On distingue plusieurs natures de chaux, selon la composition chimique de la roche d'origine.

La chaux utilisée dans cette étude est une chaux vive produite par la société BMSD-SARL située dans la ville de Saïda, Algérie (Figure III.2). Les propriétés physiques et chimiques de cette chaux sont présentées dans le Tableau III.2.



**Figure III.2 :** Format commercialisé de la chaux employée.

**Tableau III.2 :** Propriétés physiques et chimiques de la chaux de Saida [Fiche technique].

Paramètre	(%)
CaO	> 83.3
MgO	< 0.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 1.5
SiO	< 2.5
SO <sub>3</sub>	< 0.5
Na <sub>2</sub> O	0.4 - 0.5
CO <sub>2</sub>	< 5
CaCO <sub>3</sub>	< 10
Densité spécifique	2
Plus de 90 µm (%)	< 10
Plus de 630 µm (%)	0
Matériaux insolubles(%)	< 1
Densité apparente (g/l)	600-900

### III.2.3. Sable

Nous avons utilisé un sable localement commercialisé (Sable d'Oued souf). Les propriétés physiques de ce sable sont groupées dans le Tableau III.3.

**Tableau III.3 :** Caractéristiques géotechniques du sable étudié.

Propriétés	Symbole	Valeur
Masse volumique apparente, (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$	2,05
Masse volumique absolue	G <sub>s</sub>	2,65
Analyse granulométrique par tamisage	% Sable	99,6
NF P94-056	% Fines	0,4
Coefficient d'uniformité	C <sub>U</sub>	2,53
Coefficient de courbure	C <sub>c</sub>	1,16
Classification du sol (USCS)	-	SP (Poorly-graded sand: Sable mal gradué)
Equivalent sable	ESV (%)	88,56
	ESP (%)	86,39

### III.2.4. Fibres

Nous avons utilisé les fibres de polypropylène (PP). Ces caractéristiques techniques sont présentées dans le Tableau III.4

**Tableau III.4 :** Propriétés techniques de la fibre utilisée [fiche technique]

Propriété	Valeur
Type	Polypropylène
Longueur moyenne (mm)	6
Diamètre moyen (mm)	0.034
Rapport d'aspect (L/d)	176
Résistance à la rupture (MPa)	350
Module d'élasticité (MPa)	3500
Point de fusion	165 ° C
Point de combustion	590 ° C
Résistance aux acides et aux alcalis	Très forte

### III.3. Méthodes expérimentales

#### III.3.1. Détermination des caractéristiques de compactage

Les caractéristiques de compactage d'un sol, dénommées respectivement la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale, sont très utilisées en géotechnique pour l'identification des sols et l'étude du compactage notamment dans la construction des remblais, des couches de forme et des assises de chaussées. Elles sont déterminées à partir de l'essai Proctor Normal ou Modifié. Les deux essais sont identiques dans leur principe, sauf que les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée sont différentes.

Le principe de ces essais consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et le compacter selon un procédé et une énergie conventionnelle (Figure III.3). Pour chacune des valeurs de la teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. Les résultats obtenus sont ensuite portés sur la courbe Proctor qui est caractérisée généralement par une valeur maximale marquée de densité. Par définition, les coordonnées du sommet représentent la masse volumique sèche maximale et l'optimum Proctor. Les essais de compactage sont réalisés conformément à la norme ASTM D698.



**Figure III.3** : Préparation des essais de compactage

### III.3.2. Résistance en compression

La résistance à la compression non confinée a été effectuée sur des échantillons du sol conformément à la norme ASTM D2166. Chaque échantillon est compacté dans un moule cylindrique avec les caractéristiques de l'optimum Proctor. Après démoulage, tous les échantillons ont été enduits de la cire comme indiqué sur la (Figure III.4). Pour déterminer l'effet de la période de durcissement sur la propriété de résistance les échantillons d'essai ont été cirés pour maintenir leur teneur en humidité spécifiée pendant 28 et 90 jours. Après chaque période de cure, l'essai de compression non confinée est réalisé au moyen d'une presse hydraulique. La valeur de la résistance à la compression maintenue représente la moyenne de deux valeurs, pour chaque combinaison considérée.



Figure III.4 : L'essai de compression.

### III.3.3. Consolidation

L'essai de consolidation (ASTM D2435) est principalement utilisé pour étudier la compressibilité des sols à grains fins saturés. Il consiste à placer un disque de terre d'environ 19 mm de haut et 50 mm de diamètre dans un anneau en acier de même diamètre et à appliquer une

charge verticale sur l'échantillon tout en enregistrant la diminution d'épaisseur de l'échantillon (Figure III.5). Des pierres poreuses sont placées en haut et en bas de l'échantillon pour permettre à l'eau de s'échapper à partir de l'échantillon. Il existe plusieurs procédures de chargement: chargement incrémentiel, taux de déformation constant et gradient constant. La procédure de chargement incrémentiel est la plus utilisée et consiste à placer une charge sur l'échantillon pendant 24 heures tout en enregistrant le tassement correspondant de l'échantillon. La charge crée une contrainte normale totale constante  $\sigma$  à la surface de l'échantillon. Lorsque  $\sigma$  est appliqué, la contrainte hydrique (pression exercée sur l'eau) augmente car la faible perméabilité des sols fins réduit la cinétique de l'écoulement de l'eau, en conséquence, l'échappement de l'eau nécessite certain temps. La Figure III.5 représente un schéma simplifié du principe de la consolidation.

La diminution de la pression interstitielle  $u$  est associée par une augmentation correspondante de la contrainte effective ( $\sigma' = \sigma - u$ ) et à un tassement du sol. Généralement, 24 heures de chargement est suffisante pour annuler la pression interstitielle ( $u=0$ ). Par conséquent, la contrainte normale totale  $\sigma$  est égale à la contrainte normale effective  $\sigma'$  à la fin de consolidation.

Les charges et les pressions associées sont appliquées dans une séquence où la charge est doublée à chaque fois. Une séquence typique est de 12, 25, 50, 100, 200 kPa pour  $\sigma$ . Le dernier point à la fin de chaque palier de chargement (courbe de consolidation pour un incrément de chargement de 24h) est représenté par un point dans la courbe oedométrique ( $e-\log\sigma$ ).

L'indice de compression  $C_c$  est défini comme la pente de la partie linéaire de la courbe  $e-\log\sigma$  'au-delà de la partie arrondie initiale. En tant que tel,  $C_c$  est:

$$C_c = \Delta e / \Delta \log \sigma$$

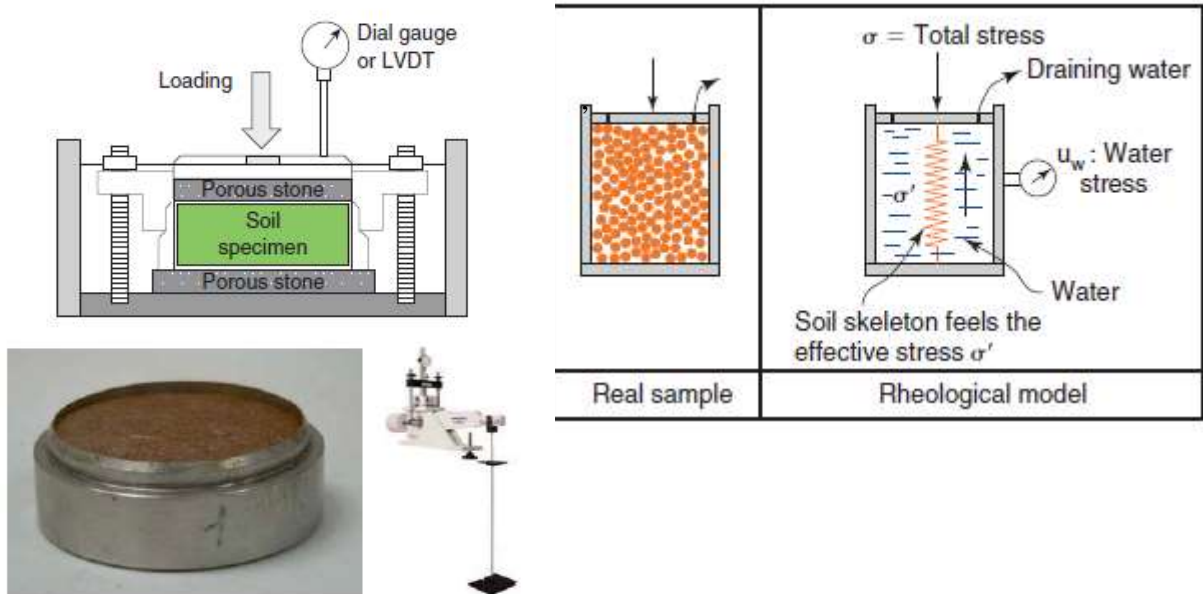


Figure III.5 : Modèle de consolidation

#### III.3.4. Teneur en chaux (Eades and Grim )

Le point de fixation de la chaux (*PFC*), proposé par Eades and Grim (1966), est le paramètre permettant d'estimer le dosage en chaux de transition entre l'amélioration et la stabilisation. Il correspond au dosage en chaux au de-là duquel on n'observe plus de changement de limite de plasticité. Lorsque le dosage de chaux excède ce seuil, la chaux est adsorbée par les minéraux argileux et devient disponible pour les réactions pouzzolaniques. Le *PFC* est déterminé par l'essai de mesure de *pH* du mélange de sol-chaux tel qu'il est décrit dans la Norme ASTM D6276-99a. Pour un mélange sol-chaux, le *PFC* est défini conventionnellement comme le dosage minimal en chaux permettant d'atteindre un *pH* égal à 12,4.

L'essai s'effectue sur une fraction <0.2mm de sol séché à l'air. Puis la chaux est mélangée, avec des dosages de l'ordre de 3, 6 et 9% par rapport au poids sec, avec 25 g de sol. Les mélanges chaux-sols ont ensuite placés dans des bouteilles en plastique contenant 250 ml de l'eau distillée. Après sa fermeture, les bouteilles sont subites à des cycles d'agitation de l'ordre de 30 secondes séparés par 10 min. Le processus d'agitation est réalisé pendant une heure pour assurer un bon malaxage du liant avec du sol.



Figure III.6 : Ph-mètre

### III.4. Protocole expérimental

Le Tableau III.5 présente le codage adopté et les différentes formulations établies. La procédure expérimentale entreprise dans ce travail expérimental est résumée dans l'organigramme de la Figure III.7.

Tableau III.5 : Programme d'essai exécuté

Code	Argile (%)	Chaux (%)	Sable%	Fibres (%)
F0/L0/S0	100	-	-	-
F0/L0/S10	90	-	10	-
F0/L0/S20	80	-	20	-
F0/L0/S30	70	-	30	-
F0/L3,34/S20	76,66	3,34	20	-
F0,3/L3,34/S20	76,36	3,34	20	0,3
F0,6/L3,34/S20	76,06	3,34	20	0,6
F0,9/L3,34/S20	75,76	3,34	20	0,9
F1,2/L3,34/S20	75,46	3,34	20	1,2
F0/L8,67/S0	91,33	8,67	-	0
F0,3/L8,67/S0	91,03	8,67	-	0,3
F0,6/L8,67/S0	90,73	8,67	-	0,6
F0,9/L8,67/S0	90,43	8,67	-	0,9
F1,2/L8,67/S0	90,13	8,67	-	1,2

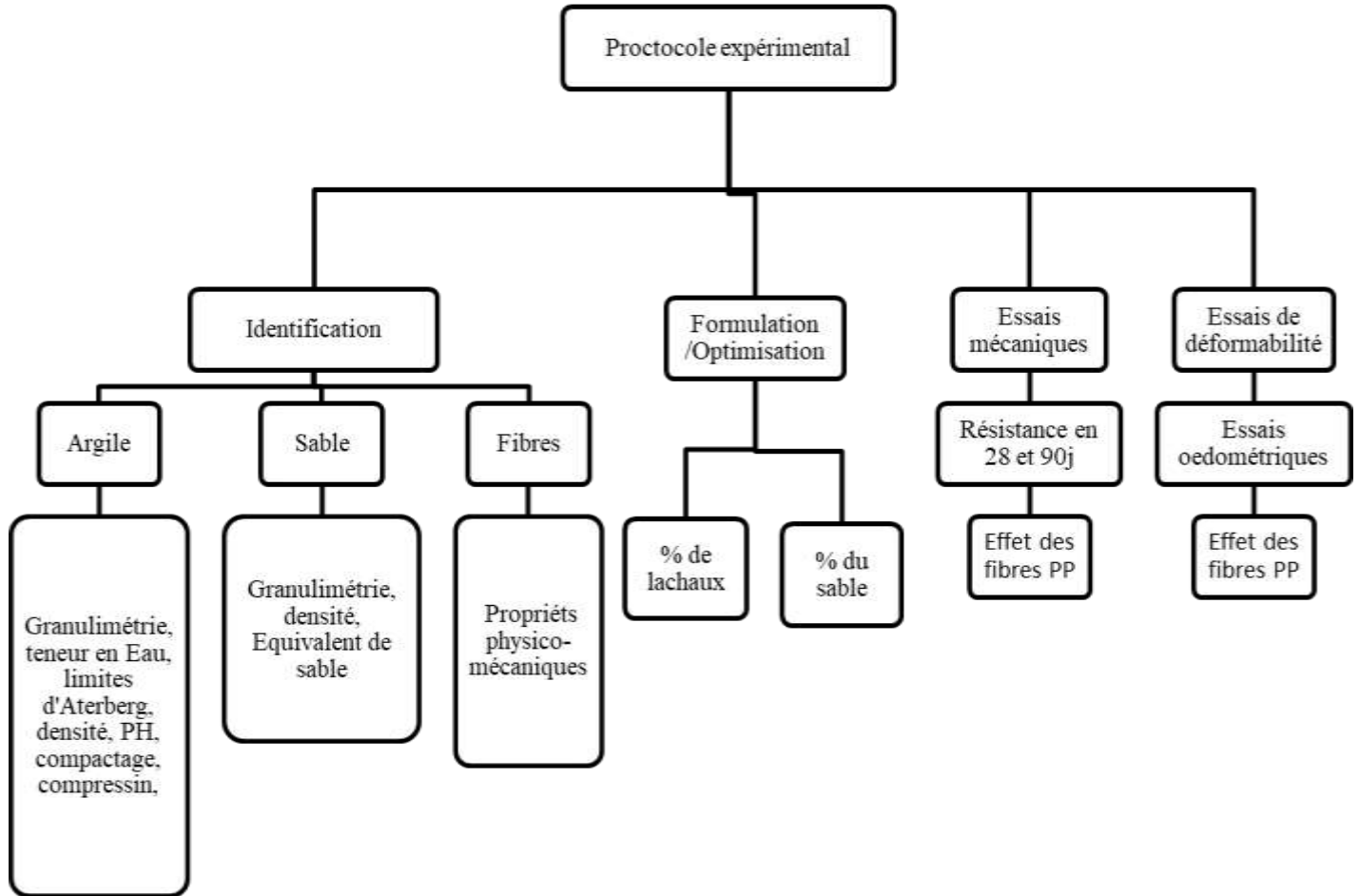


Figure III.7 : Procédure expérimentale suivie

# **Chapitre VI :** **Résultats et** **interprétation**

## VI.1. Introduction

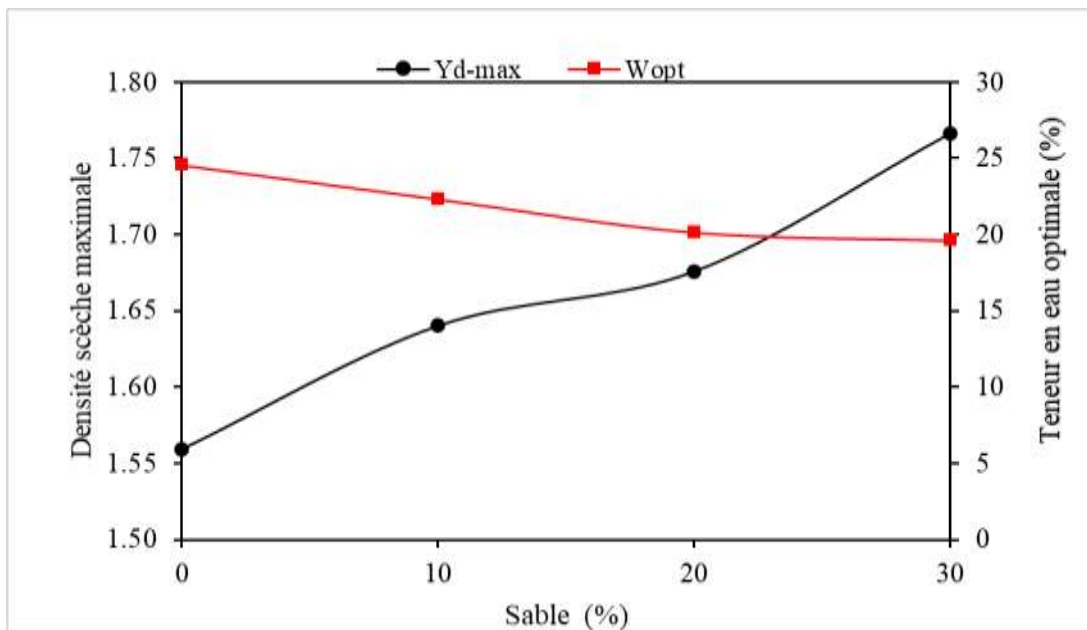
Le traitement des sols est une technique très ancienne dont son application dans le domaine routier connaît actuellement une utilisation considérable. L'utilisation de cette technique permet de réduire les coûts en valorisant les matériaux en place et préserver les ressources naturelles existantes en optimisant leur utilisation. Dans ce chapitre on présente et analyse les résultats de traitement de l'argile de Sidi Hadjres. Il s'agit d'un traitement combiné chimique et mécanique en ajoutant la chaux, le sable et des fibres PP.

## VI.2. Caractéristiques de compactage

Les résultats de compactage obtenus à partir de l'essai Proctor normal sont présentés dans le Tableau VI.1 et la Figure VI.1. Les caractéristiques de compactage (densité sèche maximale et teneur en eau optimale) ont été déterminées pour chacun des pourcentages du sable ajouté (10, 20 et 30%).

**Tableau VI.1 : Caractéristiques de compactage Proctor**

Désignation	Sable %	Chaux %	Caractéristiques de compactage		Degré de saturation [%]
			$\omega_{opt}$ [%]	$\gamma_{dmax}/\gamma_{\omega}$ [-]	
S0L0	0	0	24,58	1,56	90,72
S10L0	10		22,34	1,64	93,38
S20L0	20		20,16	1,68	89,06
S30L0	30		19,62	1,77	108,06
S0L8.67	0	8,67	30,57	1,44	98,4
S20L3.34	20	3,34	23,63	1,59	97,13



**Figure VI.1 :** Variation des caractéristiques de compactage en fonction du sable ajouté

D'après ces résultats, il est clair que l'ajout du sable seul change les caractéristiques de compactage, en effet, la densité sèche maximale augmente et la teneur en eau optimale diminue. Ce comportement peut être expliqué par la diminution de la sensibilité du sol aux variations de teneur en eau suite à l'incorporation du sable.

Par ailleurs, les résultats obtenus (Tableau VI.1) montrent que l'ajout de la chaux à l'argile naturelle avec un taux de 8,67% change la teneur en eau optimale de 24,58 à 30,57% ce qui représente une augmentation de l'ordre de 24%. Pour l'argile contenant 20% du sable et stabilisée par 3,34% de la chaux, la teneur en eau optimale varie de 20,16 à 23,63% ce qui représente une augmentation de l'ordre de 17%. Il est important d'indiquer que les dosages optimaux pour chacune des concentrations de sables est déterminé sur la base des résultats de l'essai de PH (Eads and Grim) établi dans la section 4.3 de ce chapitre.

Le comportement du sol stabilisé lors du compactage peut être expliqué par les phénomènes suivants :

- La chaux entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper plus d'espaces (structure plus ouverte).

- La densité spécifique de la chaux est généralement plus faible par rapport à celle des sols naturels testés.
- Les réactions pouzzolaniques entre les particules d'argile et la chaux dans les sols sont responsables de l'augmentation de la teneur en eau optimale vu que ce processus augmente l'affinité du sol à l'eau.

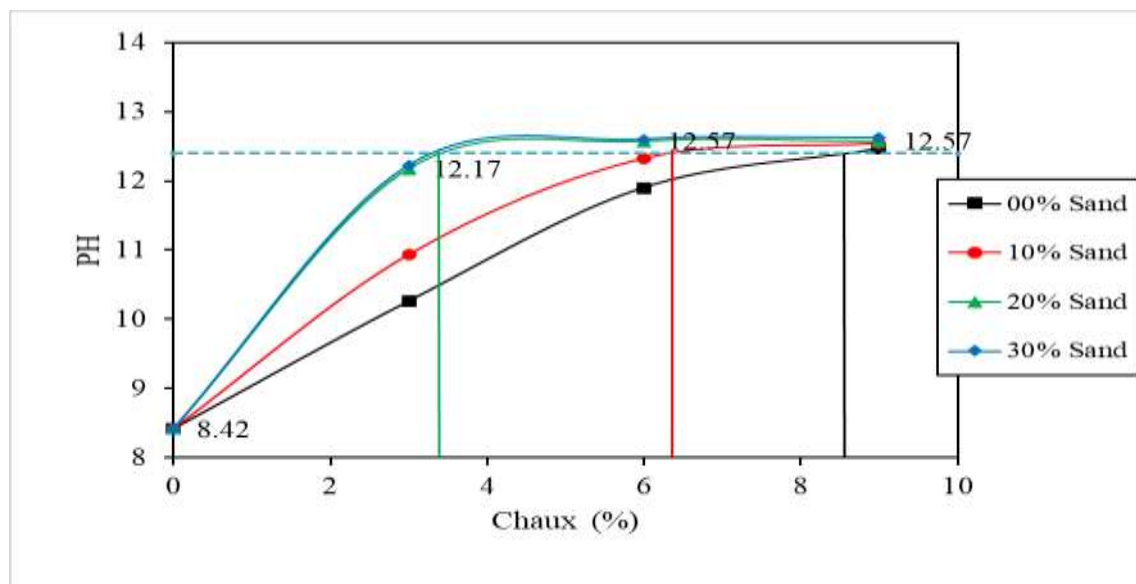
En résumé, la stabilisation du sol argileux par l'addition du sable combiné à la chaux entraîne une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale.

**VI.3. Optimisation du pourcentage de la chaux (Essai Eades and Grim )**

Les points de fixation de la chaux pour chacun des concentrations du sable sont déterminés selon l'essai Eads and Grim. Cet essai a pour but de déterminer la quantité nécessaire pour avoir une stabilisation optimale. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau VI.2 et la Figure VI.2

**Tableau VI.2 :** Optimisation de la quantité de chaux ( Eades and Grim )

Sable (%)	Chaux (%)	PH	Dosage optimal (%)
0	0	8,42	8,67
	3	10,26	
	6	11,9	
	9	12,46	
10	0	8,42	6,50
	3	10,93	
	6	12,32	
	9	12,54	
20	0	8,42	3,34
	3	12,17	
	6	12,57	
	9	12,57	
30	0	8,42	3,34
	3	12,22	
	6	12,6	
	9	12,62	



Figure

Figure VI.2 : Courbe de PH

#### VI.4. Résistance à la compression

Des essais de compression simple ont été réalisés sur l'argile de Sidi Hadjres dans l'objectif de quantifier l'effet de l'incorporation des trois agents de traitement simultanément. Une étude paramétrique a été entreprise pour optimiser la quantité de chaque additif. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau VI.2, en fonction de la période de cure, le dosage en chaux et le taux des fibres ajouté.

Les résultats montrent que l'ajout du sable seul à l'argile contribue à l'amélioration de la résistance en compression, cependant la quantité maximale à ajouter doit être limitée à 20%. Quantitativement, il a été remarqué que la résistance varie de 356 à 402 kPa lorsque 20% de l'argile est remplacée par le sable. Par ailleurs, les essais effectués montrent que le renforcement de l'argile par les fibres PP contribue également à l'amélioration de la résistance. Il a été constaté que la résistance en compression à 28 jours change de 356 à 469 kPa lorsque l'argile est renforcée les fibres seules avec un dosage de 1,2%, ce qui représente une nette amélioration de l'ordre de 32%. Ce comportement peut être expliqué par le fait que les fibres supportent une partie du chargement appliqué et jouant ainsi le rôle des renforts dans le sol.

Concernant l'effet de la chaux, les résultats obtenus montrent clairement que des améliorations importantes peuvent être réalisées en ajoutant la chaux. Ces améliorations résultent principalement des réactions pouzzolaniques entre la chaux et les minéraux argileux. En plus de

la chaux, l'association des fibres PP a conduit également à améliorer la résistance en compression. A titre d'exemple, pour la combinaison 20% de sable, 3,34% de chaux et 0,9 de fibres, la résistance enregistrée est de l'ordre de 2860 kPa ce qui donne une augmentation de l'ordre de 700% en comparaison avec l'argile naturelle.

Toutefois, d'après les courbes de la Figure VI.2, on peut constater que les meilleures valeurs de résistance sont celles obtenues avec 20% du sable.

**Tableau VI.3 :** Résultats de la résistance à la compression.

Désignation	Résistance à la compression qu (KPa)	
	28 Jours	90 Jours
S0L0	356.43	
S10L0	393.60	
S20L0	402.19	
S30L0	362.66	
S10L6.5F0.3	2056.96	3553,50
S10L6.5F0.6	2149.03	2968,11
S10L6.5F0.9	2172.77	3258,96
S10L6.5F1.2	2223.59	2952,17
S20L3,34F0,3	2520,59	3935,71
S20L3,34F0,6	2842,49	4593,20
S20L3,34F0,9	2859,93	4067,45
S20L3,34F1,2	2474,41	4162,43
S30L3,34F0,3	1961,38	
S30L3,34F0,6	2512,16	
S30L3,34F0,9	2324	
S30L3,34F1,2	2179,01	
S0L0F0,3	380,95	
S0L0F0,6	433,27	

S0L0F0,9	457,42	
S0L0F1,2	469,80	
S0L8,67F0,3	1700	3775,41
S0L8,67F0,6	1823	4591,65
S0L8,67F0,9	1908	3017,40
S0L8,67F1,2	2074	4010,82
S10L0F0,3	463,56	
S10L0F0,6	539,35	
S10L0F0,9	554,54	
S10L0F1,2	677,47	
S20L0F0,3	513	
S20L0F0,6	574	
S20L0F0,9	585	
S20L0F1,2	709	
S30L0F0,3	439,14	
S30L0F0,6	488,17	
S30L0F0,9	520,64	
S30L0F1,2	631,12	

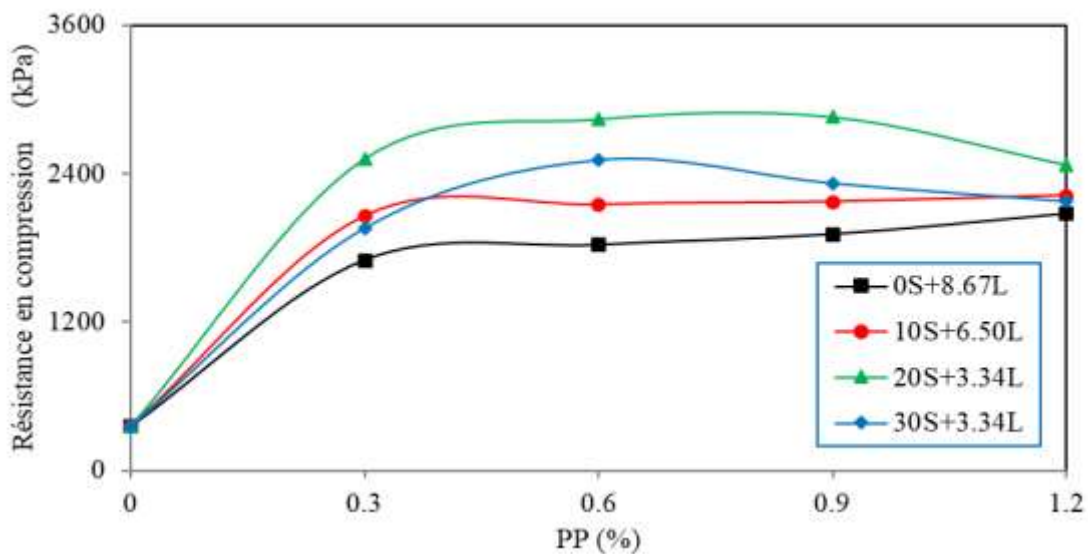
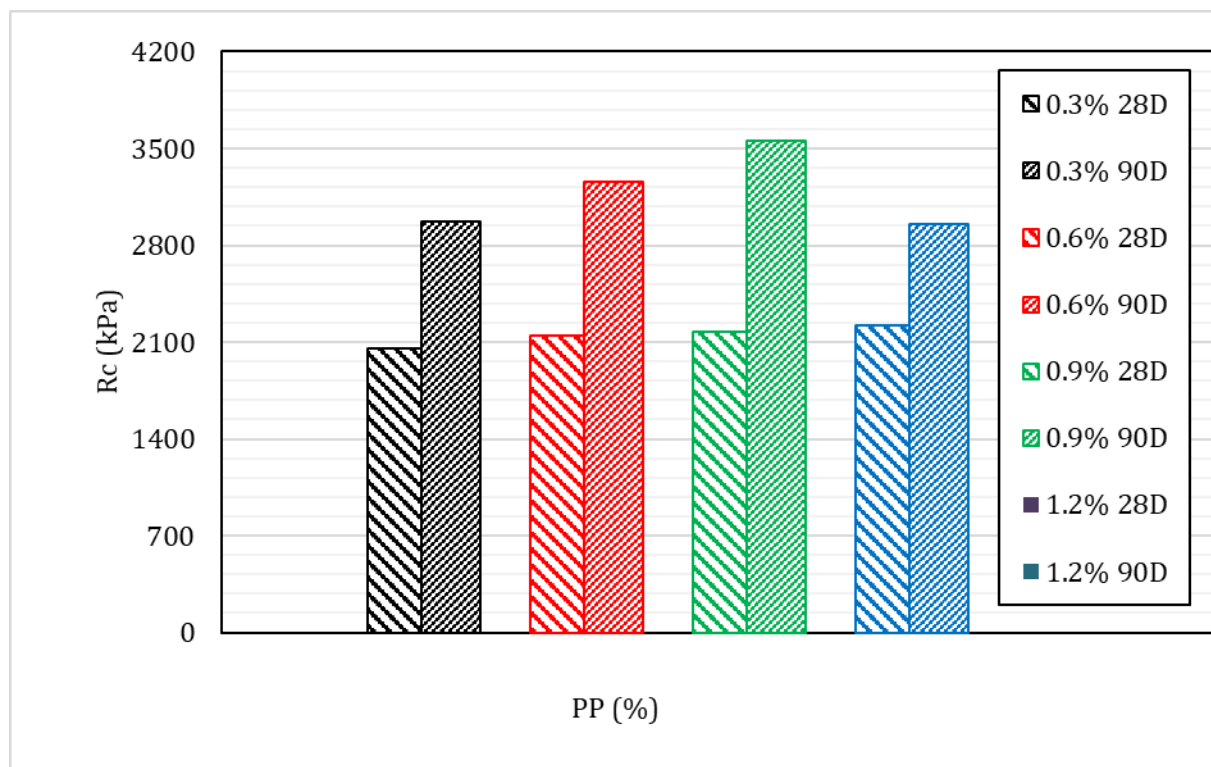


Figure VI.3 : Variation de la résistance en la compression à 28 jours



**Figure VI.4 :** Influence des stabilisants sur la Rc avec le temp de cure

### VI.5. Essais œdométriques

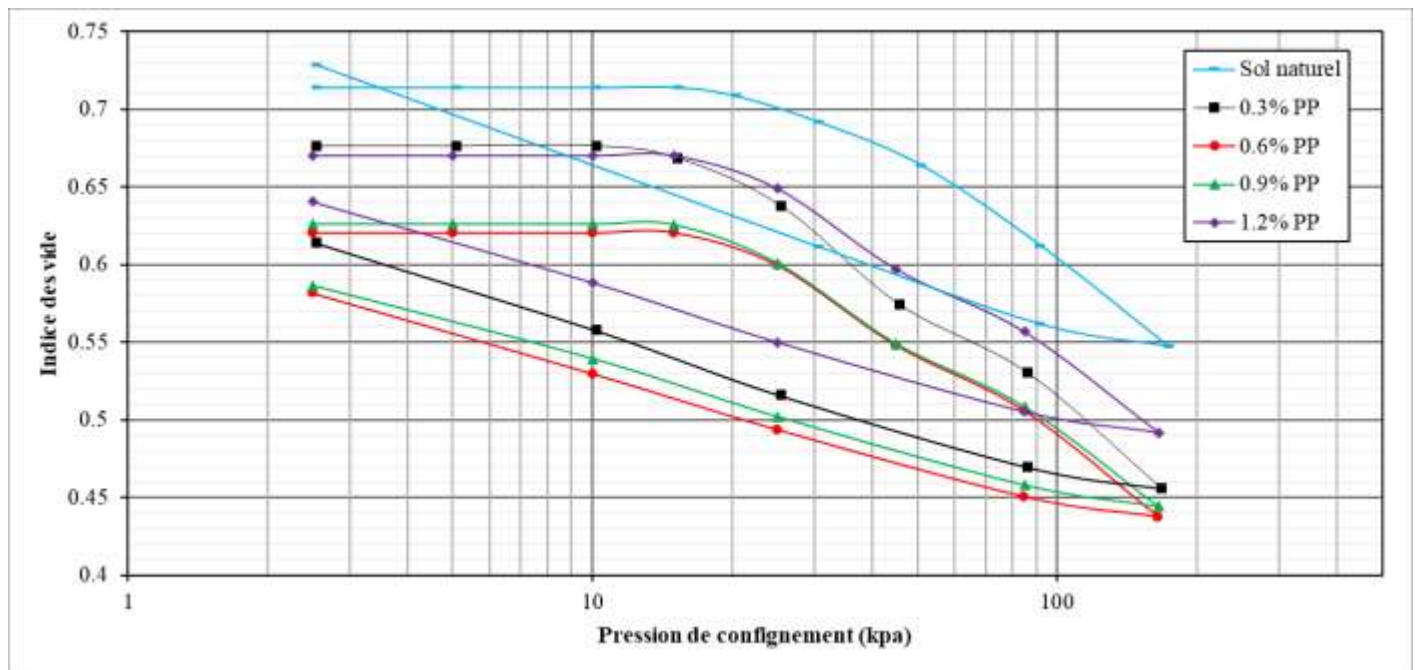
L'effet de la stabilisation de l'argile de Sidi Hajres par la chaux et les fibres PP sur le comportement œdométrique est présenté dans la Figure 4,4 et le Tableau 4,4. Sur la base des essais de compression, les essais œdométriques ont été réalisés uniquement sur les éprouvettes contenant 20% du sable (dosage optimal tiré à partir d'essais de résistance)

D'après les résultats obtenus, il est clair que la stabilisation de l'argile par les différents agents de traitement change complètement son comportement œdométrique, en effet, l'augmentation du pourcentage de fibres dans l'argile réduit significativement son aspect déformable et en conséquence diminue son caractère gonflant (diminution des indices de compression et de gonflement) ce qui est avantageux pour les ouvrages géotechniques.,

Tableau VI.4 : Effet des fibres PP sur les indices de compression et de gonflement.

Fibre (%)	Cc	Cs
0	23.64	10.72
0,3	14,45	5,40
0,6	13,47	4,83
0,9	12,83	4,97
1,2	12,79	4,64

Figure VI.5 : courbes œdométriques obtenus



**CONCLUSION  
GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

---

### Conclusion générale

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 géotechniques d'une argile par trois agents de traitement, le sable, la chaux et les fibres PP, a été expérimentalement analysée. Les fibres ont été ajoutées en différents pourcentages : 0 ; 0.3 ; 0.6 ; 0.9 ; 1.2 %, cependant le sable a été incorporé en trois pourcentages 10, 20 et 30%, par rapport à la masse totale du sol. Pour chaque pourcentage du sable la quantité optimale assurant la stabilisation a été déterminée suivant la procédure Eads and Grim.

Les principales conclusions qui l'on peut tirer à partir de cette étude sont:

- ✓ L'ajout du sable et/ou de la chaux à l'argile de Sidi Hadjres réduit sa sensibilité à l'eau en modifiant les caractéristiques de compactage, en effet la densité sèche maximale augmente et la teneur en eau optimale diminue ;
- ✓ La modification partielle de l'argile par une quantité de sable contribue à l'amélioration de la résistance en compression, cependant la quantité maximale à ajouter doit être limitée à 20%. Quantitativement, il a été obtenu que la résistance en compression varie de 356 à 402 kPa lorsque 20% de l'argile est remplacée par le sable.
- ✓ L'utilisation des fibres PP contribue également à l'amélioration de la résistance. Il a été constaté que la résistance en compression à 28 jours varie de 356 à 469 kPa lorsque l'argile est renforcée par les fibres seules avec un dosage de 1,2%, ce qui représente une nette amélioration de l'ordre de 32%. Ce comportement peut être expliqué par le fait que les fibres PP supportent une partie du chargement appliqué et jouant ainsi le rôle des renforts dans le sol.
- ✓ Les résultats obtenus montrent clairement que des améliorations importantes peuvent être réalisées en ajoutant la chaux. Ces améliorations résultent principalement des réactions pouzzolaniques entre la chaux et les minéraux argileux. En plus de la chaux, l'association des fibres PP améliore considérablement la résistance en compression. A titre d'exemple, pour la combinaison 20% de sable, 3,34% de chaux et 0,9% de fibres, la résistance enregistrée est de

## CONCLUSION GENERALE

---

l'ordre de 2860 kPa ce qui donne une augmentation de l'ordre de 700% en comparaison avec l'argile naturelle.

En résumé, les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'utiliser différents agents de traitement pour stabiliser et même renforcer une argile connue par sa grande sensibilité à l'eau et également son caractère très gonflant. Sur la base des résultats obtenus dans cette recherche, il est recommandé de limiter l'utilisation du sable à 20%. Cependant, les meilleures performances sont données par les éprouvettes contenant 0,9% de fibres PP. En fin, vu la spécificité de cette argile et sur toute la présence d'agents de diverses natures, il s'avère que le mécanisme gérant le comportement de l'ensemble n'est pas complètement défini, ce qui nécessite des études plus approfondies.

## Références bibliographiques

**ACI 544-1R State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete;**

**Association canadienne de normalisation, Canada, 453 p. 2004.**

ASTM D2166 (2000) Standard test methods for unconfined compressive strength of cohesive soil. ASTM International

ASTM D2435 (2000) Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. ASTM International

ASTM D2487 (2000) Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International

ASTM D421 (2000) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International

ASTM D422 (2000) Standard Test Method for Particle Size Distribution by Hydrometer. ASTM International

ASTM D4318 (2000) Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM International

ASTM D6276 (2000) Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement. ASTM International

ASTM D698 (2000) Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. ASTM International

### **Braja**

**Chawki M., ((2019).** Étude de l'effet des fibres de polypropylène sur les propriétés géotechniques d'une argile stabilisée. Université de M'sila

**CSA A23.1/2 Béton : constituants et exécution des travaux/Essais concernant le béton.**

**KRIKER.** Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et mortiers renforcés par ces fibres en climats chaud et sec , Thèse de doctorat d'état, ENP , Algérie, 2005.

L. C. Dang and H. Khabbaz, 2019." Influence of Lime and Fiber on Strength and Consolidation Characteristics of Expansive Soil" Recent Advancements on Expansive Soils.

**Meddah A., & Merzoug K. (2017).** Feasibility of using rubber waste fibers as reinforcements for sandy soils. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(1), 5.

**Meddah A., (2019).** Cours d'amélioration des sols. Université de M'sila

Mekki L, 2018 « Comportement d'une argile expansive fortement surconsolidée ». Thèse de Doctorat En Sciences Université de Mohamed Boudiaf de M'sila.

**Merzoug K., (2016).** Caractérisation d'un sol sableux contenant des fibres caoutchouteuses. Mémoire de Master. Université de M'sila

Ouled mehieddune a.kadir 2015 « Etude de comportement d'un béton compacté routier armé des fibres » Mémoire de master Université de Mohamed Boudiaf de M'sila.

**Site Internet :**

<http://www.wikiTp.fr>

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

[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)

[www.solsmesures.fr](http://www.solsmesures.fr)

## ملخص:

في هذه الدراسة، تم تحليل إمكانية تثبيت التربة من خلال المعالجة المركبة (الكيميائية والميكانيكية) تجريبياً. يتكون مبدأ الدراسة من استخدام ثلاثة عوامل في وقت واحد: ألياف البولي بروبيلين (PP) والجير والرمل. التربة المختارة من النوع الطيني والتي تم جمعها من منطقة سيدي هجرس (المسيلة). يُعرف هذا الطين جيداً بقابلية تشوهه العالية وشخصيته العالية جداً في الانتفاخ. تم دمج الألياف بنسب مختلفة: 0.3؛ 0.6؛ 0.9 و 1.2% من الكتلة الكلية للتربة، ومع ذلك يضاف الرمل بثلاث نسب: 10 و 20 و 30%. يتكون البرنامج التجريبي المنفذ من دراسة تأثير هذه الإضافات على الخصائص الجيوتقنية لهذا الطين. بينت النتائج المتحصل عليها أن الطريقة المستخدمة في هذا البحث غيرت من سلوك الطين. في الواقع، إنه يحسن المقاومة بشكل كبير، ويقلل من الحساسية للماء وبالتالي يقلل من تشوه هذه التربة. بالإضافة إلى ذلك، فقد لوحظ أن الألياف توفر مزيداً من الليونة لسلوك هذا الطين، وهو أمر مفيد للهياكل الجيوتقنية.

**الكلمات المفتاحية:** استقرار، التعزيز، الطين، الجير، الألياف

## Abstract

In this study, the potentiality to stabilize of soil through a combined treatment (chemical and mechanical), is experimentally analyzed. The principle of the study consists of using three agents simultaneously: lime, sand and polypropylene fibers (PP). The soil chosen is clayey type collected from Sidi Hadjres region (M'sila). This clay is well known by its high deformability and very high swelling character. The fibers are incorporated with different percentages: 0.3; 0.6; 0.9 and 1.2% by to the total mass of the soil, however the sand is added in three percentages: 10, 20 and 30%. The experimental program carried out consists in studying the effect of these additions on the geotechnical properties of this clay.

The results obtained show that the approach used in this research changed the behavior of clay. Indeed, it makes it possible to considerably improve the resistance, reduces the sensitivity to water and consequently reduces the deformability of this soil. In addition, it has been observed that the fibers provide more ductility to the behavior of this clay, which is advantageous for geotechnical structures.

**Key words:** stabilization, reinforcement, clay, lime, polypropylene fibers.

## Résumé

Dans cette étude, la potentialité de stabiliser un sol à travers un traitement combiné (chimique et mécanique), a été expérimentalement analysée. Le principe de l'étude consiste à utiliser trois agents de traitement simultanément : la chaux, le sable et les fibres de polypropylène (PP). Le sol choisi est de type argileux prélevé de la région de Sidi Hadjres (Wilaya de M'sila). Cette argile est connue par son aspect déformable et son caractère gonflant très élevé. Les fibres ont été incorporées en différents pourcentages : 0,3; 0,6; 0,9 et 1,2% par rapport à la masse totale du sol, cependant le sable est ajouté en trois pourcentages:10, 20 et 30%. Le programme expérimental entrepris consiste en l'étude de l'effet de ces ajouts sur les propriétés géotechniques de cette argile.

Les résultats obtenus montrent que l'approche utilisée dans cette recherche a changé le comportement de l'argile. En effet, elle permet d'améliorer considérablement la résistance, réduit la sensibilité à l'eau et par conséquent réduit le caractère déformable de ce sol. En outre, il a été constaté que les fibres apportent plus de ductilité au comportement de cette argile, ce qui est avantageux pour les ouvrages géotechniques.

**Mots clés :** stabilisation, renforcement, argile, chaux, fibres de polypropylène.

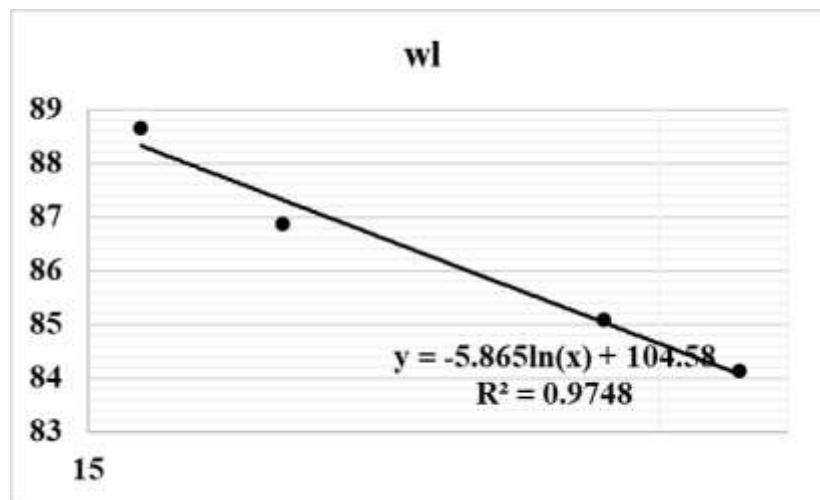
## Annexes

### A.1. Tableau de résultats de limite de liquidité WL

La date de l'essai : 25 / 03 / 2020

Description de l'échantillon : **S<sub>0</sub>L<sub>0</sub>**

N° de coupe	16	19	28	33
N° de la tare				
P. sol humide +tare (g)	43,599	41,98	45,164	40,176
P. sol sec + tare (g)	36,175	35,405	36,8	34,025
P. de la tare (g)	27,8	27,837	26,97	26,715
P. de l'eau (g)	7,424	6,575	8,364	6,151
P. de sol sec (g)	8,375	7,568	9,83	7,31
WL	85.70			



Limite de liquidité : **WL = 85,70 %**

## Limite de plasticité

N°de essai	essai 01	essai 02
<b>N° de la tare</b>	29	30
<b>P. sol humide +tare (g)</b>	11,9	12,251
<b>P. sol sec + tare (g)</b>	11,33	11,056
<b>P. de la tare (g)</b>	9,65	9,704
<b>P. de l'eau (g)</b>	0,57	1,195
<b>P. de sol sec (g)</b>	1,68	1,352
<b>Teneur en eau (%)</b>	33,929	88,388

Limite de plasticité :  $W_p = 33.93\%$

## Indice de plasticité

$I_p = 85.70 - 33.93$

**$I_p = 42,60$**

### A.2. Tableau de résultats de Sedimentation

La date de l'essai : 29 / 03 / 2020

Temps de Lecture (mm)	Lecture R	Temp T°
30S	24	28
1	23.5	28
2	23	28
5	23	28
10	22.5	28
20	22	28
40	21.5	28.5
80	21	28
4h :240	20	28
24h :1440	13	28

Analyse sédimentométrique	
Diamètre équivalent	Tamisé (%)
75.00 $\mu\text{m}$	98.06
55.00 $\mu\text{m}$	96.12
38.00 $\mu\text{m}$	96.12
25.00 $\mu\text{m}$	94.18
17.00 $\mu\text{m}$	92.24
12.00 $\mu\text{m}$	90.30
8.00 $\mu\text{m}$	88.36
5.00 $\mu\text{m}$	84.48
2.00 $\mu\text{m}$	57.31

### A.3. Tableau de résultats de

La date de l'essai : 2 / 03 / 2020

Description de l'échantillon : **S<sub>20</sub>L<sub>0</sub>F**

F(kg)	$\sigma$ [Kpa]	Com	tass	Hv	e
0,5	2,5	5000	0,00	8,07	0,72
1	5	5000	0,00	8,07	0,72
2	10	5000	0,00	8,07	0,72
3	15	4928	0,07	7,99	0,72
6	30	4625	0,38	7,69	0,69
10	50	4190	0,81	7,26	0,65
18	90	3514	1,49	6,58	0,59
34	170	2740	2,26	5,81	0,52
18	90	2900	2,1	5,9653	0,53574
6	30	3373	1,627	6,4383	0,57822
3	15	3710	1,29	6,7753	0,60848
0,5	2,5	4559	0,441	7,6243	0,68473

<b>Surface</b>	19,625
<b>H</b>	19,2
<b>Volume</b>	376,8
<b>Mh</b>	133,313
<b>M tarre</b>	59,401
<b>Ms</b>	73,91
<b>Hs</b>	13,68

Indices de compression : **C<sub>c</sub> = 24.50%**

Indice de gonflement : **C<sub>s</sub> = 9.35%**

