

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 :

Ben Younes Fouzia Nesrine & Bouzidi Rachida

Intitulé

**Amélioration des propriétés géotechniques d'une
argile par l'ajout des fibres de polypropylène**

Soutenu devant le jury composé de :

Pr. BEDDAR Miloud

Université de M'sila

Président

Dr. MEDDAH Abdelaziz

Université de M'sila

Encadreur

Mr. LAHMADI Azzedine

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

*On remercie Allah le tout puissant de nous avoir donné la
volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait
pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr.*

*Meddah Abdelaziz, on le remercie pour son encadrement
exceptionnel durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nous tiens à remercier aussi et à exprimer toute nos
gratitude à Abd Elmalik GOUFI pour son aide.*

*Nos remerciements pour toute l'équipe de Lctp et toute
personne qui a participé de près ou de loin.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A celle qui m'a donné la vie, les deux personnes meilleurs sur mon cœur '' Mama et papa '' à celui qui m'a appris le sens la volonté et le courage, a celui qui a été toujours là pour moi, maman mon chère tu es ma important , à toi mon père 'thameur' qui m'as apporté par sa présence permanente la force (épaule forte), vous réalisez le rêve merci pas assez et ne manquez pas votre droit cependant merci pour tout

Mes très chers frères à ma sœur, et tout ma famille & pour tous mes amis sans oubliée mon ange ' A ', et tous ceux m'ont aidé, je remercie aussi pour accompli

Merci

bouzidi Rachida

Dédicace

Je dédie mon travail premièrement a l'âme de mon grand-père (l'entrepreneur Sakhri), qui a voulu que je sois dans ce domaine .

Et celle qui m'a donné a la vie, qui s'est sacrifié pour mon bonheur, qui a joué le rôle d'un ami, d'une sœur et d'une mère, a ma maman.

Et mon père, qui a insisté pour terminer mes études et à mon frère, qui a toujours été à mes cotes et mon soutien.

Et ma famille qui ma soutenu.

Et En fin a mes amis.

Ben Younes Fouzia Nestine

ملخص

في هذه الدراسة تم جمع طين من منطقة سيدي هجرس (ولاية المسيلة مثبتة بتأثير مشترك من ثلاثة عوامل هي الرمل والجير وألياف البولي بروبيلين ، ويعرف هذا الطين بمظهره المشوه وخصائصه العالية جدا. الانتفاخ: تم دمج الألياف بنسب مختلفة: 0.3؛ 0.6؛ 0.9 و 1.2% و نسبة إلى الكتلة الكلية للتربة ، ومع ذلك تمت إضافة الرمل في ثلاث نسب: 10 ، 20 و 30%. البرنامج التجريبي المنفذ يتكون من الدراسة. تأثير هذه الإضافات على خصائص المقاومة والتشوه لهذا الطين.

بينت النتائج المتحصل عليها أن الطريقة المستخدمة في هذا البحث غيرت من سلوك الطين. في الواقع ، فإنه يجعل من الممكن تحسين المقاومة بشكل كبير (الضغط والقص أحادي المحور) ، ويقلل من الحساسية للماء ، وبالتالي يقلل من الطبيعة المشوهة لهذه 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، ألياف البولي بروبيلين

Abstract

In this study, a clay collected from the region of Sidi Hadjres (Wilaya de M'sila) is stabilized by a combined effect of three agents; sand, lime and polypropylene fibers. This clay is well known by its deformability and its very high swelling character. Fibers were incorporated in different percentages: 0.3, 0.6, 0.9 and 1.2% in relation to the total mass of the soil, while the sand is added in three percentages: 10, 20 and 30%. The experimental program carried out was consisted to analyze the effect of such additions on the resistance and deformability characteristics of this clay.

The results obtained show that the behavior of this clay was changed by approach used in this research. Indeed, it help to considerably improve the resistance (uniaxial compression and shear), reduces the sensitivity to water and consequently decreases the deformability of this soil. In addition, it was observed that the fibers provide more ductility to the behavior of the clay, which is advantageous for geotechnical works.

Key words: stabilization, reinforcement, clay, lime, polypropylene fibres

Résumé

Dans cette étude, une argile collectée de la région de Sidi Hadjres (Wilaya de M'sila est stabilisée un effet combiné de trois agents ; le sable, la chaux et les fibres de polypropylène. 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 caractéristiques de résistance et déformabilité 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 (compression uniaxiale et cisaillement), réduit la sensibilité à l'eau et par conséquent diminue 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.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

1	Concepts généraux sur les techniques d'amélioration des sols.....	14
1.1	INTRODUCTION.....	14
1.2	LES ARGILES.....	15
1.2.1	Définition.....	15
1.2.2	Minéraux argileux.....	15
1.3	LES ARGILES GONFLANTES.....	16
1.3.1	Les sols argileux gonflants au sens géotechnique.....	16
1.3.2	Le Gonflement au sens mécanique.....	17
1.3.3	Cinétique du gonflement.....	18
1.3.4	Identification des argiles gonflantes.....	19
1.4	PROCEDES D'AMELIORATION DES SOLS.....	20
1.4.1	Renforcement des sols par éléments linéaires résistants (terre armée).....	21
1.4.2	Renforcement des sols par éléments discrets ou fibres.....	21
1.4.3	Stabilisation chimique des sols.....	22
1.4.4	Traitement par chaux.....	22
1.4.5	Traitement par ciment.....	23
1.5	Conclusion.....	24
2	Généralités sur l'utilisation des fibres en Génie Civil.....	25
2.1	INTRODUCTION.....	25
2.2	TYPES DES FIBRES.....	26
2.2.1	Fibres naturelles.....	26

2.2.2	Les fibres animales.....	26
2.2.3	Fibres végétales :.....	26
2.2.4	Fibres métalliques.....	28
2.2.5	Fibres synthétiques.....	29
2.3	UTILISATION DANS LA STABILISATION DES SOLS.....	32
2.3.1	Effet des fibres sur le comportement des sols sableux.....	32
2.3.2	Effet des fibres sur le comportement des sols argileux.....	33
2.4	CONCLUSION.....	33
3	Matériaux et procédure expérimentale.....	34
3.1	INTRODUCTION.....	34
3.2	MATERIAUX UTILISES.....	35
3.2.1	Sol utilisé.....	35
3.2.2	La chaux.....	37
3.2.3	Sable.....	38
3.3	METHODES EXPERIMENTALES.....	39
3.3.1	Détermination des caractéristiques de compactage.....	39
3.3.2	Essai œdométrique.....	40
3.3.3	Essai de cisaillement rectiligne.....	42
3.3.4	Teneur en chaux (Eades and Grim).....	43
3.4	PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....	43
4	Résultats et interprétation.....	45
4.1	INTRODUCTION.....	45
4.2	CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE.....	46
4.3	OPTIMISATION DU POURCENTAGE DE LA CHAUX (ESSAI EADES AND GRIM).....	48
4.4	RESISTANCE A LA COMPRESSION.....	49
4.5	ESSAIS CISAILLEMENT.....	50
4.6	ESSAIS ŒDOMETRIQUES.....	53

Liste des Figures

Fig. 1.1 structure des minéraux argileux	16
Fig. 1.2. Terre armée	21
Fig. 1.3 Traitement à la chaux	23
Fig. 1.4. Traitement par ciment	23
Fig. 2.1 Fibres de chanvre	27
Fig. 2.2 fibres métalliques	29
Fig. 2.3 Fibres de Verre.....	30
Fig. 2.4 : Fibre de polypropylène	31
Fig. 2.5 Fibres caoutchouteuses ((Moussab, 2018)	32
Fig. 3.1 Préparation de sol.....	35
Fig. 3.2 aspect général du sable utilisé.....	38
Fig. 3.3 fibres de polypropylène utilisées.....	39
Fig. 3.4 Essai de compactage	40
Fig. 3.5 principe de l'essai de cisaillement direct.....	42
Fig. 3.6 PH-mètre	43
Fig. 4.1 Variation de Teneur en eau optimale en fonction du sable ajouté	46
Fig. 4.2 Variation de Densité sèche en fonction du sable ajouté.....	47
Fig. 4.3. Courbe de PH 2	48
Fig. 4.4 Résultats de la résistance à la compression.....	49
Fig. 4.5 Effet des fibres sur la contrainte de cisaillement.....	51
Fig. 4.6 Effet des fibres sur la contrainte de cisaillement.....	51
Fig. 4.7 Effet des fibres sur la contrainte de cisaillement.....	52
Fig. 4.8 Effet des fibres sur la contrainte de cisaillement.....	52
Fig. 4.9 Courbes oedométriques typiques _effet de fibres	54

Liste des Tableaux

Tableau 2-1 Les caractéristiques physiques des fibre végétales les plus utilisées .(Dalila 2017)	27
Tableau 2-2 Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales.	28
Tableau 2-3 Caractéristiques des fibre de polypropylène (hayet 2016).....	31
Tableau 3-1 Caractéristiques géotechniques du sol étudié.....	36
Tableau 3-2 Propriétés physiques et chimiques de la chaux de Saida [Fiche technique]	37
Tableau 3-3 Caractéristiques géotechniques du sable étudié	38
Tableau 3-4 Programme d’essai exécuté.....	44
Tableau 4-1 Caractéristiques de compactage Proctor	46
Tableau 4-2] Désignation	46
Tableau 4-3 Caractéristiques de compactage	48
Tableau 4-4] Désignation	48
Tableau 4-5 Effet des fibres sur les caractéristiques de cisaillement.....	51
Tableau 4-6 Effet de sable sur les caractéristiques de cisaillement	52
Tableau 4-7 Effet des fibres PP sur les caractéristiques de cisaillement du mélange argile- sable traité à la chaux	53
Tableau 4-8 Effet des fibres PP sur les indices de compression et de gonflement.	54

INTRODUCTION GENERALE

La stabilisation des sols est l'une des principales activités des ingénieurs géotechniciens. Ce terme désigne un ensemble de procédés 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 sa 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 et le chargement appliqué (type et intensité), 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 est un renforcement.

Le renforcement des sols peut être principalement réalisé en utilisant des éléments linaires résistants (métalliques ou géosynthétiques) préalablement orientés ou en utilisant des éléments courts 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 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 utilisée en stabilisation par 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).

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 région de Sidi Hadjres , M'sila, Algérie. 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 traité 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 les différents aspects du comportement de ce sol (caractéristiques de résistance et déformabilité). Les fibres de polypropylène ont été ajoutées en différents pourcentages 0,3; 0,6; 0,9 et 1,2%.

Par ailleurs, on mentionne que ce travail de recherche complète celui réalisé par Chaa (2020) sur le sol de Sidi Hadjres et en utilisant les mêmes agents de traitement, en effet, l'étude s'appuie principalement sur ses résultats surtout la partie de résistance en compression et compactage. Il est important de mentionner également qu'à cause des mesures de précaution liées à pandémie-COV19 (temps et accès limités) une partie de l'étude n'est pas encore terminée et sera validée dans d'autres travaux de recherche.

Le manuscrit est composé des chapitres suivants ;

1. Introduction générale
2. Chapitre I: Concepts généraux sur les techniques d'amélioration des sols
3. Chapitre II: Généralités sur l'utilisation des fibres en Génie Civil
4. Chapitre III: Matériaux et procédure expérimentale
5. Chapitre VI: Résultats et interprétation
6. Conclusions générale

1 Concepts généraux sur les techniques d'amélioration des sols

1.1 INTRODUCTION

Dans le domaine du génie civil, la demande d'utilisation de terrains pour la construction n'a cessé d'augmenter au cours des dernières décennies. Dans ce cas, les ingénieurs sont parfois obligés de commencer à améliorer ou renforcer les sols médiocres (de faible portance).

Le renforcement des sols est un nouveau et spécifique domaine d'amélioration des sols, on peut les distinguer en deux grandes catégories :

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.

Ce chapitre présente un abrégé sur les différentes techniques de renforcements des sols.

1.2 LES ARGILES

1.2.1 Définition

Les argiles constituants principaux des sols formés de particules fines ($< 2 \mu\text{m}$) résultent de la désintégration physique ou mécanique des roches suivie d'une transformation chimique. Elles sont très sensibles à la présence d'eau.

Ce type des sols sont cohésifs, compressibles, très difficiles à manipuler et à compacter et parfois gonflants. Ils sont très peu perméables, donc leur teneur en eau est très lente.

1.2.2 Minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des phyllo silicates 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 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. 1)

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. 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 également appelées smectites, ont la même structure atomique que l'illite, mais les couches sont maintenues ensemble par un van der 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.

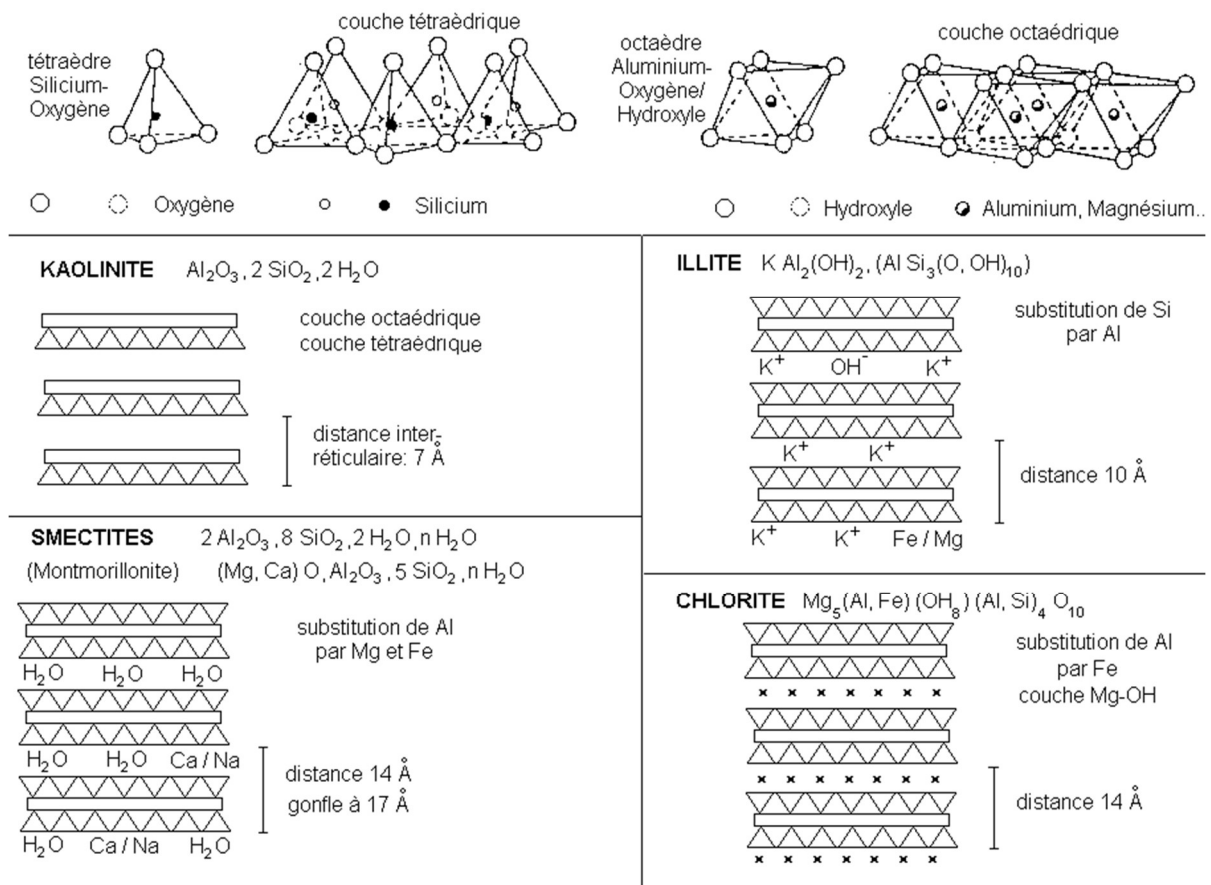


Fig. 1.1 structure des minéraux argileux

1.3 LES ARGILES GONFLANTES

1.3.1 Les sols argileux gonflants au sens géotechnique

Pour un géotechnicien ou un mécanicien des sols, un sol argileux est un matériau meuble ou déformable avec une proportion importante en éléments de taille inférieure à 80 µm et 2 µm. Ces éléments sont constitués de minéraux argileux mais aussi d'autres minéraux non argileux (quartz, feldspaths, carbonates, matière organique décomposée...). La nature et la proportion

des minéraux argileux sont principalement responsables des caractéristiques géotechniques, du comportement hydrique et mécanique du matériau (plasticité, compressibilité, retrait et gonflement...). Les classifications géotechniques des sols utilisées par les acteurs du Génie Civil permettent de classer les sols et de les positionner suivant des critères précis et différents.

A l'échelle internationale, un exemple de classification USCS « Unified Soil Classification System » développée par le « The Corps of Engineers » (Holtz et Kovacs, 1981). Cette classification se base sur des critères granulométriques et sur les limites d'Atterberg. Ces critères couplés à ceux mécaniques et hydrauliques permettent de définir des domaines d'utilisation pour leur emploi dans le Génie Civil. Les sols argileux correspondent aux « Fine grained soils with 50 % or more passes n°200 sieve », soit un passant équivalent à un diamètre de 75 µm en France. En fonction de la limite de liquidité (< ou > à 50 %), des sous-classes se distinguent telles que ML, CL, OL (Silts and clays with $w_L \leq 50\%$) et MH, CH, OH (Silts and clays with $w_L \geq 50\%$).

1.3.2 Le Gonflement au sens mécanique

Le phénomène de gonflement, de même que le tassement, peut provenir d'une modification de l'état de contraintes dans le sol en présence d'eau. Un sol est constitué de 3 phases : une phase solide (les particules solides), une phase liquide (eau interstitielle en général) et une phase gazeuse (bulles d'air). Le sol est saturé si la phase gazeuse disparaît, c'est-à-dire si tous les vides inter particulaires sont occupés par l'eau interstitielle. Considérons ici un élément de sol saturé à l'équilibre. Dans un sol saturé soumis à une contrainte totale σ (géostatique ou surcharge extérieure σ_e), cette dernière se décompose selon la théorie de Terzaghi (1951) de la façon suivante :

$$\sigma_e = \sigma = \sigma' + u$$

où u désigne la pression interstitielle de l'eau des pores et σ' la contrainte effective, c'est-à-dire la contrainte exercée sur le squelette solide du sol.

Si l'élément de sol considéré est situé sous la nappe phréatique à une cote z , la pression interstitielle est égale à la pression exercée par la colonne d'eau sus-jacente, soit $u_0 = \gamma_w \cdot z$.

Si l'on permet alors au sol de se drainer, un phénomène de consolidation va se développer, correspondant à l'expulsion de l'eau en surplus. Un nouvel équilibre va alors s'établir pour l'état de contraintes, avec $u_0 = 0$, $\sigma' = \sigma_e$

Dans un milieu poreux, l'existence conjointe d'une phase gazeuse et liquide provoque le développement de ménisques capillaires air-eau. Le développement de ces ménisques dans la structure du sol est la caractéristique principale d'un milieu non saturé (Delage et Cui, 2000), et traduit une pression négative de l'eau appelée succion. Si la contrainte σ_e est alors supprimée, le même phénomène se produit en sens inverse, et immédiatement : $u = -\sigma_e$, $\sigma' = \sigma_e$

La pression interstitielle u devient négative (succion négative) et opposée à la variation de contrainte totale. Dans des conditions de libre circulation de l'eau, un phénomène de gonflement va alors se développer, exprimant l'absorption de l'eau et le transfert d'une contrainte négative de l'eau sur le squelette solide, jusqu'à l'état final où $u = 0$, $\sigma' = 0$

Il est donc possible d'affirmer que si la consolidation exprime une diminution de la pression interstitielle jusqu'à $u=0$, le gonflement exprime quant à lui la diminution de la succion ($-u$) jusqu'à son annulation. La succion capillaire du terrain s'exprime alors par la relation

$$S = u_a - u_w$$

Où u_a représente la pression de l'air dans le sol et u_w , la pression interstitielle de l'eau dans le sol.

1.3.3 Cinétique du gonflement

Le processus de gonflement des sols argileux est contrôlé par plusieurs mécanismes superposés à différentes échelles et s'exprime de manière différée à l'échelle macroscopique. Par conséquent, la cinétique du gonflement s'exprime par la relation existant entre la déformation et le temps. Elle est en général très lente en raison de la faible perméabilité des argiles. Serratrice et Soyez (1996) précisent que la cinématique du gonflement dépend de la nature des argiles, de leur état hydrique et de leur état de chargement. Suivant ces auteurs, la courbe de gonflement en fonction du logarithme du temps (Figure 1. 2) est obtenue, soit lors d'un essai de gonflement libre, soit lors d'un palier de déchargement. La déformation peut se décomposer en deux phases : un gonflement primaire et un gonflement secondaire (Alonso et al., 1989 ; Serratrice et Soyez, 1996 ;etc....)

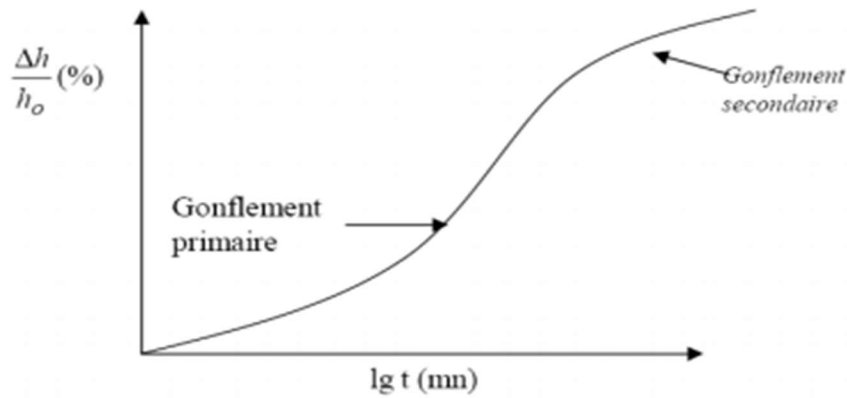


Fig. I .2 : Courbe du taux de gonflement en fonction du temps

La figure I .2 montre que l'évolution du taux de gonflement vertical ($\Delta h/h_0$) en fonction du temps suit une loi hyperbolique suivant la relation suivante (Dakshanamurthy, 1978 ; Vayssade, 1978 ; Parceveaux, 1980)

Le gonflement primaire est une phase relativement rapide, qui est dû à la dissipation de succion dans les macropores du sol par migration de l'eau dans l'éprouvette à partir de ses extrémités. Cette phase est contrôlée par le gradient de charge hydraulique et la perméabilité du sol. Elle dure en général quelques heures à quelques jours suivant le type et l'état de consolidation initial du sol argileux. La phase de gonflement secondaire est quant à elle liée à l'hydratation progressive des minéraux argileux de la structure et correspond à un processus de cinétique très lent d'après Alonso et al. (1989, 1991). Ces faibles vitesses de déformation sont en accord avec des observations faites dans des massifs de roche autour de tunnels notamment, où le processus de gonflement peut se dérouler pendant plusieurs années, voire plusieurs décennies (Steiner et al., 1993).

1.3.4 Identification des argiles gonflantes

L'identification des sols gonflants par observation de la micro structures des argiles (forme et assemblage). Cette démarche est coûteuse et ne donne pas des règles claires les paramètres mécaniques du retrait-gonflement. En revanche, une identification primaire peut s'effectuer sur la base des essais relativement simple et économique peut présenter un intérêt considérable puisque permettra de gagner en temps et en coût. Plusieurs approches empiriques sont décrites par différents auteurs permettant d'apprécier le potentiel de gonflement des sols (Tableaux 1-3). En effet plusieurs classifications ont été proposés par différents chercheurs pour estimer le

potentiel du gonflement en fonction des paramètres du sol tels que l'indice de plasticité, limite de retrait (Djedid et al. 2001)

Potentiel de gonflement d'après Altmeyer (1955)		Potentiel de gonflement d'après Ranganatham et Satyanarayana (1965)		Potentiel de gonflement d'après Snethen (1980)	
w_s (%)	Potentiel de gonflement	I_R (%)	Potentiel de gonflement	I_p (%)	Potentiel de gonflement
< 10	Fort	0 – 20	Faible	> 35	Très élevé
10 – 12	Critique	20 – 30	Moyen	22 – 48	Elevé
> 12	faible	30 – 60	Fort	22 – 32	Moyen
		> 60	Très fort	< 18	Faible

1.4 PROCÉDES D'AMÉLIORATION DES SOLS

Sur le terrain, le sol de fondation n'est pas toujours en mesure de supporter les charges de la structure, par exemple, un sol granuleux et meuble provoquera un tassement important sous la charge appliquée. Dans ce cas, selon la profondeur de la couche, un compactage statique ou dynamique peut être utilisé pour augmenter la résistance au cisaillement et le tassement.

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 l'ajout de la chaux et le ciment modifié les caractéristiques physiques, mécaniques ou hydrauliques des sols fins, cette amélioration est nommée 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

1.4.1 Renforcement des sols par éléments linéaires résistants (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.

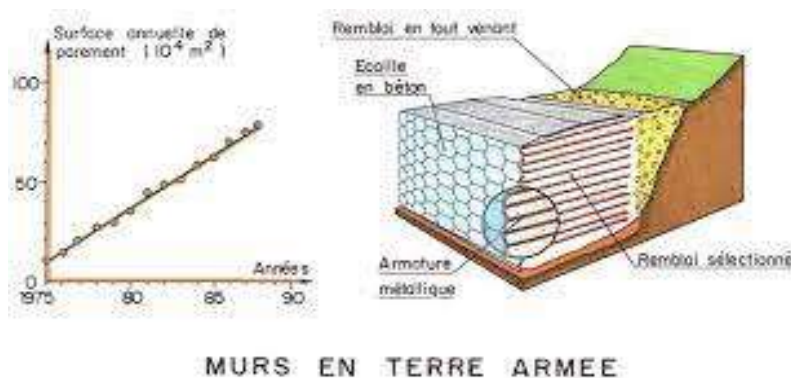


Fig. 1.2. Terre armée

1.4.2 Renforcement des sols par éléments discrets ou fibres

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.

1.4.3 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.

1.4.4 Traitement par chaux

La chaux se trouve sous plusieurs formes, oxyde de calcium CaO , hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 , chaux dolomitique (magnésienne) $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$, chaux dolomite monohydrate $\text{Ca(OH)}_2 \cdot \text{MgO}$. 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 son 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



Fig. 1.3 Traitement à la chaux

1.4.5 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.



Fig. 1.4. Traitement par ciment

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre une description générale sur les argiles et les méthodes d'amélioration de sols a été présentée (renforcement des sols par éléments linéaires résistants, renforcement par fibre, traitement par chaux, traitement par ciment). Ces techniques permettent d'augmenter la résistance du sol ainsi que réduire la déformabilité sous l'effet du chargement appliqué.

2 Généralités sur l'utilisation des fibres en Génie Civil

2.1 INTRODUCTION

Les fibres de renfort confèrent aux composites leurs caractéristiques mécaniques comme la rigidité, la résistance à la rupture et la dureté. Elles peuvent améliorer aussi certaines de leurs propriétés physiques telles que le comportement thermique, la résistance à l'abrasion. Les qualités recherchées des fibres sont leurs caractéristiques mécaniques élevées, leur masse volumique faible, la facilité de leur mise en œuvre et leur faible coût.

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille,), leur dimension (macro ou microfibrilles) et leurs propriétés mécaniques. (Mohammed, raissel 2017)

2.2 TYPES DES FIBRES

On retrouve sur le marché plusieurs types de fibres, elles peuvent être classées par familles, un choix approprié du type de fibre à utiliser est essentiel. Chaque type de fibre possède des caractéristiques particulières qui les rendent apte à servir à une utilisation plutôt qu'à une autre. Ainsi l'adoption d'une fibre influencera les facteurs suivants :

- Densité,
- Résistance tension et en compression,
- Résistance aux impacts et à la fatigue,
- Module d'élasticité,
- Conductivités thermique et électrique,
- Stabilité dimensionnelle,
- Résistance aux conditions environnementales. (Siham et aicha 2016) .

2.2.1 Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont classées généralement en fonction de leurs origines : Animale, végétale et minérale. Les fibres d'origine végétale sont constituées majoritairement de cellulose et possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles d'origine animale. Ces dernières, telles que la laine et la soie, sont largement utilisées dans le domaine du **textile** Les fibres d'origines végétales peuvent être classées en sous familles selon d'où elles ont été extraites ; graines, fruits, écorce, feuilles, bois, tiges ou canne. (Dalila 2017)

2.2.2 Les fibres animales

Les fibres naturelles sont issues d'animaux et se divisent en trois groupes principaux, la laine, les poils, la soie naturelle.

2.2.3 Fibres végétales :

Les fibres végétales sont extraites des plantes, soit de la tige comme le lin et le chanvre, soit de la feuille comme les fibres de palmier dattier voir même du fruit lui-même comme la noix de coco. Elles font partie de la biomasse. Elles sont caractérisées par une faible densité, un pouvoir d'isolation thermique, des résistances élevée sen traction, et une biodégradabilité qui constitue un avantage majeur pour l'écologie. Leurs principaux composants sont la cellulose,

l'hémicellulose, la lignine et les pectines. Leurs proportions déterminent l'ensemble des propriétés de fibre



Fig. 2.1 Fibres de chanvre

Tableau 2-1 Les caractéristiques physiques des fibre végétales les plus utilisées .(Dalila 2017)

Fibre	Diamètre (mm)	Densité (g/cm ³)	Teneur en eau à l'état naturel (%)	Absorption d'eau après 5 min (%)	Absorption d'eau à la saturation (%)
Sisal	1.5 - 1.37 0.75- 1.07	1.5-1.37 0.75- 1.07	10.97-14.44	89.30 67-92	92 190-250
Noix de coco	1,2 0,11 -0,53	1 ,21- 1,17 0,67 – 1,00	11,44 – 15,85	43,20 22-28	80,40 58-135

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre sa densité et son teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Et elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité.

Les propriétés physiques et mécaniques des fibres végétales ont été traitées par beaucoup de chercheurs.

Tableau 2-2 Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales.

Fibre	Densité (g/cm ³)	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (Map)	Module de Young (Gap)
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
Palmier dattier	0.51-1.08	7.5-17.4	170-290	2 .1-5.25

2.2.4 Fibres métalliques

Ce type de fibre, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil. En effet, les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interfaçage entre fibre et matrice. (Dalila 2017)



Fig. 2.2 fibres métalliques

2.2.5 Fibres synthétiques

Cette catégorie est apparue à la fin des années 30. Certaines de ces fibres furent découvertes, par accident, lors de recherches sur les explosifs (plastiques). Les polyamides ont été les premières fibres synthétiques à prendre d'assaut le marché et les magasins. L'effort de guerre donna un élan aux fibres synthétiques puisque certaines fibres naturelles devaient être remplacées. Par exemple, la soie servant à faire des parachutes se faisait plus rare puisque les routes d'approvisionnement étaient bloquées. Le polyester arriva rapidement sur le marché, suivi par plusieurs autres fibres (Siham et aicha 2016)

➤ Fibre de verre

Sous leur forme habituelle, elles sont caractérisées par une très grande fragilité aux chocs attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration, sous la forme de fibre de faible diamètres, le verre perd ce caractère acquière de bonnes caractéristiques mécaniques et sont utilisées pour fabriquer des éléments de faible épaisseurs, avec des matrices de pâte ou mortier ou de micro béton. (hayet 2016)



➤ **Fibres de polypropylène**

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile. Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfinés des produits chimiques. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages

Fig. 2.3 Fibres de Verre

suivants : déformabilité élevée, imputrescibilité et bonne résistance en traction qui peut atteindre 800 Map. Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions (Londonderry House Hôtel), ainsi que l'élaboration de panneaux décoratifs de 33cm d'épaisseur et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux. Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60 mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment. Leur module d'élasticité plus faible que la pâte durcie. Il convient de les utiliser de préférence pour les pièces minces devant résister, soit à l'action corrosive de certaines ambiances dans lesquelles l'acier pourrait se corroder rapidement, soit aux chocs mécaniques. (Siham et aicha 2016) .



Fig. 2.4 : Fibre de polypropylène

Tableau 2-3 Caractéristiques des fibre de polypropylène (hayet 2016)

Fibres	Polypropylène
Diamètre (μm)	10 – 200
Longueur (mm)	25 – 75
Rt (Map)	400 – 750
Densité	0.9
E 10^3 Map	5 – 10
Allongement à la rupture en %	15 – 25
R_{Feu} Temps Max C°	150
Coefficient de dilatation (μ/m)	90

➤ **Fibres de caoutchouc**

Les fibres issues des déchets caoutchouteux dans en génie civil, notamment dans le béton et les sols, est considérée comme une solution intéressante sur les plans économique et environnemental, en effet, elle permet de réduire les impacts écologiques des déchets de caoutchouc sur l'environnement et la santé de L'être humain, d'une part, et de réduire les besoins en matière première, d'autre part.



Fig. 2.5 Fibres caoutchouteuses ((Moussab, 2018)

2.3 UTILISATION DANS LA STABILISATION DES SOLS

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. (Mahdi, 2019)

2.3.1 Effet des fibres sur le comportement des sols sableux

L'effet de l'incorporation des fibres sur le comportement des sableux a été étudié par(Meddah and Merzoug, 2017)

Les fibres ont été ajoutées au argile en différents dosages 0,3 , 0 ,6 , 0,9 , et 1,2%. Puisque le comportement des sols argile est fortement lié à la densité du sable et à la contrainte de confinement appliquée, chacun de ses pourcentages a été soumis aux trois contraintes normales

(100, 200 et 400 kPa), et à deux niveaux de compacité (lâche et compacte). La démarche expérimentale entreprise dans cette étude consiste en l'étude de l'influence des fibres sur les propriétés mécaniques du sable. Les principaux résultats rapportés par les auteurs sont :

- Les déformations s'évaluent plus lentement en présence des fibres, ce qui signifie que son existence dans le sable réduit la cinétique de développement des déformations et rend la rupture plus ductile.
- La résistance au cisaillement et le déplacement maximal augmente avec l'augmentation du dosage en fibres.
- L'existence de la fibre dans le squelette granulaire empêche le déplacement relatif entre les grains créant ainsi un frottement supplémentaire.

2.3.2 Effet des fibres sur le comportement des sols argileux

L'effet des fibres sur l'argile ont été étudié par (Mahdi, 2019) dont les principales conclusions obtenues dans son travail sont les suivantes :

- 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.

2.4 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. (Mahdi, 2019)

3 Matériaux et procédure expérimentale

3.1 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 (1)

3.2 MATERIAUX UTILISES

3.2.1 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 ° 40'30 "N et 4 ° 02'16" E). La Figure III.1 montre l'aspect du sol étudié à son état naturel (in situ) et après broyage (<3,15mm). 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, du ciment ou d'un traitement combiné chaux-fibres (CHAA, 2020)



Fig. 3.1 Préparation de sol

Tableau 3-1 Caractéristiques géotechniques du sol étudié

Caractéristiques de	Propriété	Valeur
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 ³]	2.7
Caractéristiques granulométriques ASTM D-421 &422	Gravie (>5 mm) [%]	0
	Sable (5-0.08) [%]	2
	Limon (0.08-0.002) [%]	23
	Argile (<0.002 mm) [%]	75
Classification	USCS	CH: High plasticity Clay (argil 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

3.2.2 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.

Tableau 3-2 Propriétés physiques et chimiques de la chaux de Saida [Fiche technique]

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

3.2.3 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.



Fig. 3.2 aspect général du sable utilisé

Tableau 3-3 Caractéristiques géotechniques du sable étudié

Propriétés	Symbole/Unité	Valeur
Masse volumique apparente	(g/cm ³)	2,05
Masse volumique absolue	GS	2,65
Analyse Granulométrique NF P94-056	% Sable	99,6
	% Fines	0,4
Coefficient d'uniformité	Cu	2,53
Coefficient de courbure	Cc	1,16
Equivalent sable	ESV (%)	88,56
	ESP(%)	86,39
Classification		SP- (Poorly-graded sand: Sable mal gradué)

III.2.4. Fibres :

Nous avons utilisé les fibres de polypropylène (PP).



Fig. 3.3 fibres de polypropylène utilisées

3.3 METHODES EXPERIMENTALES

3.3.1 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.



Fig. 3.4 Essai de compactage

3.3.2 Essai œdométrique

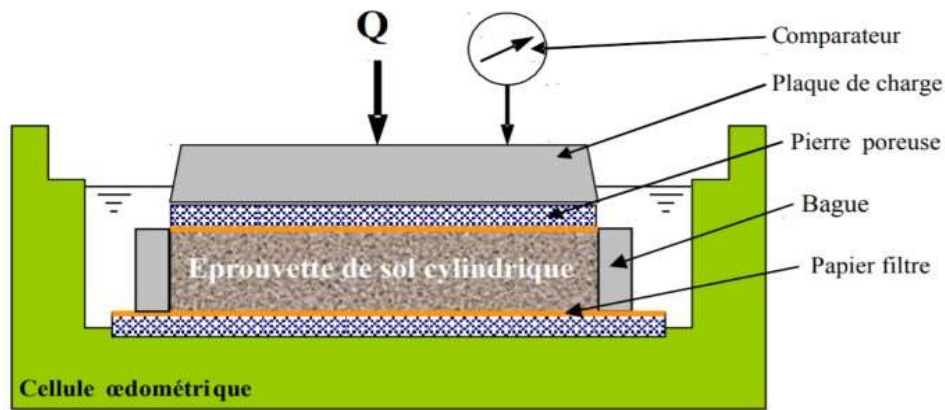
Dispositif expérimental de l'odomètre est un appareil de chargement permettant la réalisation de compressions verticales pour lesquelles les déformations horizontales sont empêchées par une bague (moule métallique rigide).

L'appareil comprend une cellule et un bâti de chargement.

- La cellule : elle est présentée sur le figure. L'échantillon de sol à étudier, de forme cylindrique (section S , hauteur initiale h_0), est placé entre deux pierres poreuses saturées, dans une bague de même diamètre intérieur que l'échantillon.
- Le bâti de chargement : il permet d'appliquer sur le piston reposant sur la pierre poreuse supérieure une force Q et de la maintenir constante pendant un temps donné.

On impose ainsi à l'échantillon :

- une contrainte totale verticale constante : $= Q/S$,
- des déformations radiales (horizontales) nulles,
- le système de drainage permet à l'eau de s'évacuer ou d'entrer dans l'échantillon suivant des trajets verticaux ascendant et descendant, tout en permettant au sol de rester saturé.



L'essai consiste à mesurer la variation de hauteur en fonction du temps de l'échantillon de sol soumis à une contrainte σ . Normalement ces mesures s'effectuent pendant 24 h pour un σ donné. Au bout de 24 h on considère que la consolidation primaire est terminée. On procède alors à un 2ème chargement sur le même échantillon avec une contrainte σ en générale deux fois supérieure à la contrainte précédente, et ainsi de suite.

Pour une contrainte de chargement donnée, la mesure du tassement Δh en fonction du temps t permet de tracer la courbe de consolidation sous la forme $\Delta h = f(\log t)$ ou $\Delta h = f\sqrt{t}$. A partir de ces courbes on peut calculer le coefficient de consolidation c_v (m²/s) grâce auquel on peut calculer le temps de tassement d'une couche de sol en place sous une charge quelconque en utilisant la relation:

$$t = \frac{c_v * h_d^2}{c_v}$$

où:

- t est le temps de tassement (s),
- h_d la hauteur de drainage de la couche de sol (m),
- t_v le facteur temps (un paramètre sans dimension). (HAL Id 2018)

3.3.3 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.

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-bottes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un piston d'exercer sur le sol une contrainte normale σ déterminée. La demi-botte 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

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 sols renforcés de fibres, grâce à sa simplicité. (Mahdi 2019)

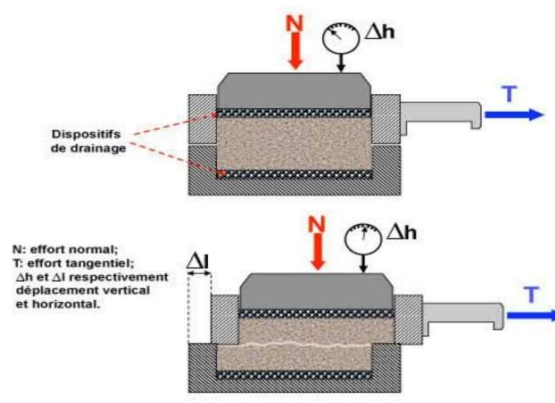


Fig. 3.5 principe de l'essai de cisaillement direct

3.3.4 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 été placés dans des bouteilles en plastique contenant 250 ml de l'eau distillée. Après sa fermeture, les bouteilles sont soumises 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.



Fig. 3.6 PH-mètre

3.4 PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le Tableau 4 présente le codage adopté et les différentes formulations établies. La procédure expérimentale entreprise dans ce travail expérimental est résumée dans l'organigramme

Tableau 3-4 Programme d'essai exécuté

Code%	Argile%	Sable%	Chaux%	Fibre%
F0/L0/S0%	100%	-	-	-
F0/L0/S10%	90%	10	-	-
F0/L0S/20%	80%	20	-	-
F0/L0/S30%	70%	30	-	-
F0/L8.87/S0%	91.23	-	8.87	-
F0/L6.5/S10%	83.5	10	6.5	-
F0/L3.34/S20%	86.66	20	3.34	-
F0/L3.34/S30%	66.66	30	3.34	0.3
F0.3/L3.34/S20%	76.36	20	3.34	0.6
F0.6/L3.34/20%	76.06	20	3.34	0.9
F0.9/L3.34/20%	75.76	20	3.34	1.2
F1.2/3.34/20%	75.46	20	3.34	0.3
F0.3/L0/S0%	99.7	-	-	0.6
F0.6/L0/S0%	99.4	-	-	0.9
F0.9/L0/S0%	99.1	-	-	1.2
F1.2/L0/S0%	98.8	-	-	0.3
F0.3/L0/20%	79.7	20	-	0.6
F0.6/L0/20%	79.4	20	-	

4 **Résultats et interprétation**

4.1 INTRODUCTION

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces. 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 discute 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 Polypropylène.

4.2 CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE

Les résultats de compactage obtenus à partir de l'essai Proctor normal sont présentés dans le Tableau VI.1 et les Figures VI.1 et VI.2. on a déterminé les caractéristiques de compactage (densité sèche maximale et teneur en eau optimale) pour chacun des pourcentages du sable ajouté (10, 20 et 30%).

Tableau 4-1 Caractéristiques de compactage Proctor

Tableau 4-2] Désignation	Sable %	Caractéristiques de compactage		Degré de saturation [%]
		ω_{opt} [%]	$\gamma_{dmax}/\gamma_{\omega}$ [-]	
S0L0	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

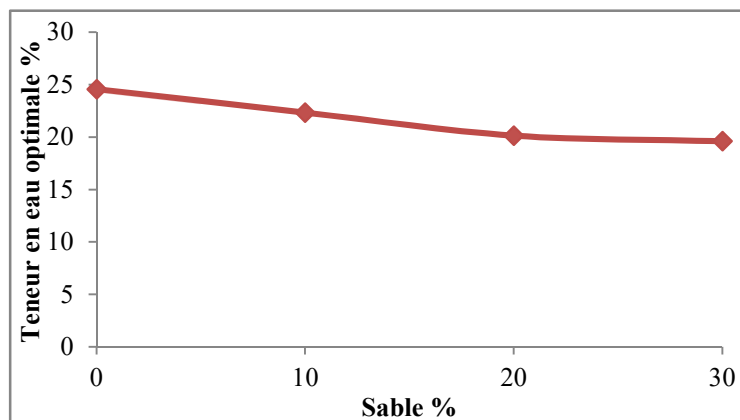


Fig. 4.1 Variation de Teneur en eau optimale en fonction du sable ajouté

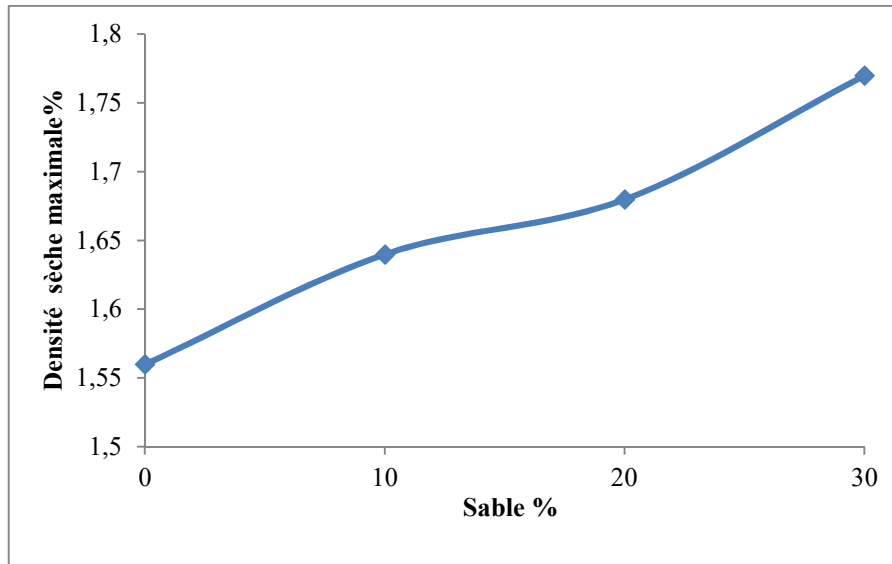


Fig. 4.2 Variation de Densité sèche en fonction du sable ajouté

A partir de ces résultats, l'ajout du sable modifie les caractéristiques de compactage, où la teneur en eau optimale diminue et la densité sèche maximale augmente.

Alors que ce comportement est à cause de la diminution de la sensibilité du sol aux variations d'eau suite à l'incorporation de sable.

D'un autre côté les résultats de (tableau VI.2) indiquent que l'ajout de chaux à l'argile naturelle avec un taux de 8,67% modifie la teneur en eau optimale de 24,58 à 30,57% ce qui représente et pour l'argile avec 20% de sable et stabilisée par 3,34% de chaux, la teneur en eau optimale varie de 20,16 à 23,63%.

Les dosages optimaux de chaque concentration de sable sont délibérés sur les résultats de l'essai de PH (Eads and Grim)

Tableau 4-3 Caractéristiques de compactage

Tableau 4-4] Désignation	La chaux %	Caractéristiques de compactage		Degré de saturation [%]
		ω_{opt} [%]	$\gamma_{dmax}/\gamma_{\omega}$ [-]	
S0L8.67	8,67	30,57	1,44	98,4
S20L3.34	3,34	23,63	1,59	97,13

4.3 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 l'objectif de déterminer la quantité nécessaire pour avoir une stabilisation optimale. Les résultats obtenus sont présentés dans Figure VI. 3

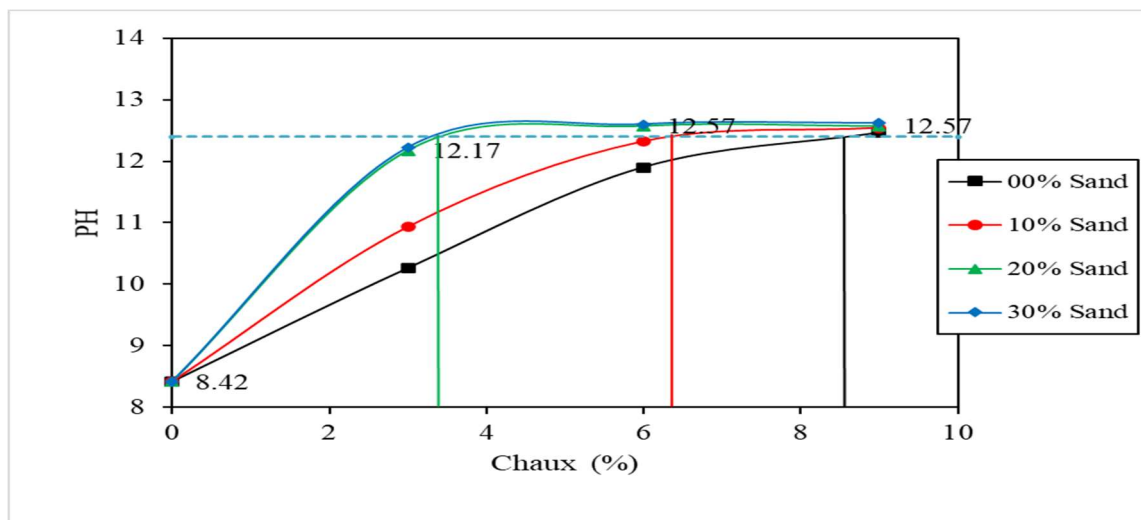


Fig. 4.3. Courbe de PH 1

4.4 RESISTANCE A LA COMPRESSION

Les résultats obtenus des essais de compression sur l'argile de Sidi Hadjres pour les différentes combinaisons sont présentés dans le Fig. VI.4.

Les résultats montrent que l'ajout du sable à l'argile seul permet d'augmenter la résistance à la compression, mais la quantité maximale d'ajout doit être limitée à 20%. Quantitativement, lorsque 20% de l'argile est remplacée par le sable, la résistance varie de 356 à 402 kPa.

Les résultats obtenus montrent également que le renforcement de l'argile par des fibres PP contribue également à l'amélioration de la résistance en compression. A titre d'exemple, lorsque l'argile est renforcée par 1,2% de fibre PP la résistance à la compression à 28 jours varie de 356 KPa à 469 KPa, soit une amélioration de 32%. Ce comportement peut s'expliquer par le fait qu'une partie de la charge appliquée est supportée par les fibres jouant ainsi le rôle de renfort dans le sol.

Par ailleurs, si le mélange argile-sable est stabilisée par la chaux puis l'ensemble est renforcé par des fibres, des améliorations importantes peuvent être réalisées. Ces améliorations résultent principalement des réactions pouzzolaniques entre la chaux et les minéraux argileux.

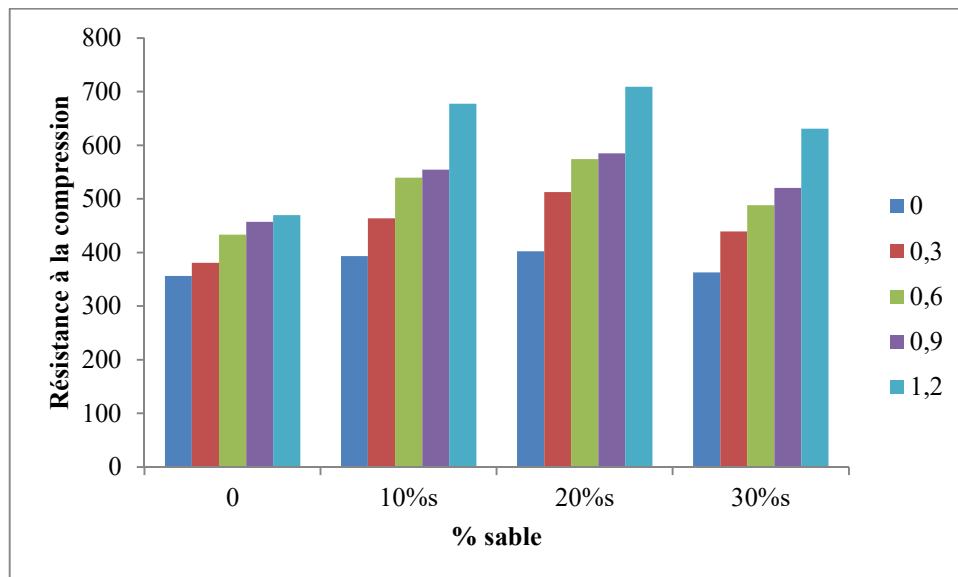


Fig. 4.4 Résultats de la résistance à la compression

4.5 ESSAIS CISAILLEMENT

Cet essai montre l'effet de fibre et la chaux et le sable sur l'argile de sidi Hadjres, l'essai est réalisé sur les combinaisons suivantes :

Argile pure, mélange argile-sable, argile renforcée en fibre et le mélange argile- sable traité à la chaux et renforcé par des fibres.

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux et les figures, en fonction de la résistance développée au cours cisaillement, la cohésion, l'angle de frottement interne du mélange et les courbes de comportement en cisaillement.

Vue l'existence de trois ajouts différents et pour une meilleure analyse, les résultats sont interprétés séparément ;

- L'introduction des fibres seules améliore considérablement la résistance au cisaillement, en effet la cohésion augmente d'une façon très remarquable de 140,31 à 276,53 kPa lorsque les fibres PP sont ajoutées avec une teneur de 1,2% ce qui représente une augmentation de l'ordre de 97,08%. Il est aussi clair que l'angle de frottement de l'argile augmente par l'inclusion des fibres. L'angle de frottement change de 16,38 à 29,21 pour le taux d'incorporation (1,2%) ce qui donne une augmentation de l'ordre de 78,3%.
- L'inclusion de sable seul montre que la cohésion et l'angle de frottement augmentent dans l'intervalle 0 – 20%, Au-delà de cette limite la cohésion du mélange argile-sable diminue. Ce comportement peut être expliqué par le frottement, l'enchevêtrement et la cohésion entre les particules. Les facteurs agissant sur ces trois raisons ont évidemment une grande influence sur la valeur de l'angle de frottement interne du sol, qui dépend principalement de la compacité, la granulométrie et la forme des particules.
- L'utilisation des différents agents simultanément ont un grand effet sur la résistance au cisaillement comme le montre le Tableau IV.5

Tableau 4-5 Effet des fibres sur les caractéristiques de cisaillement

% de fibres	Contraintes de cisaillement (kPa)			Cu (kPa)	ϕ_u
	50	100	200		
0	149,512	177,992	196,399	140,31	16,38
0,3	193,549	213,370	283,046	158,71	31,42
0,6	244,491	255,000	318,377	212,80	27,79
0,9	273,277	301,547	358,087	245,01	29,48
1,2	291,181	290,813	369,395	276,53	29,21

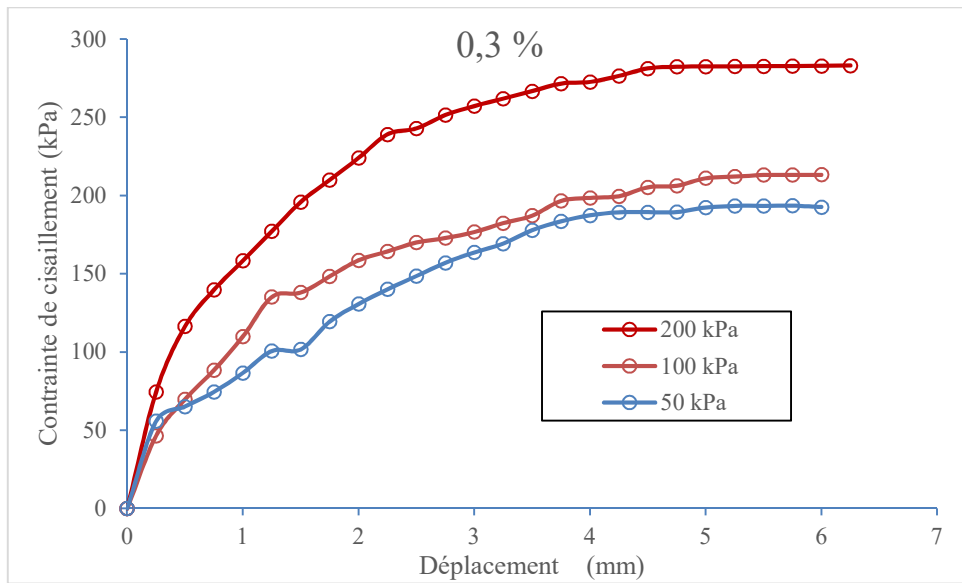


Fig. 4.5 Effet des fibres sur la contrainte de cisaillement

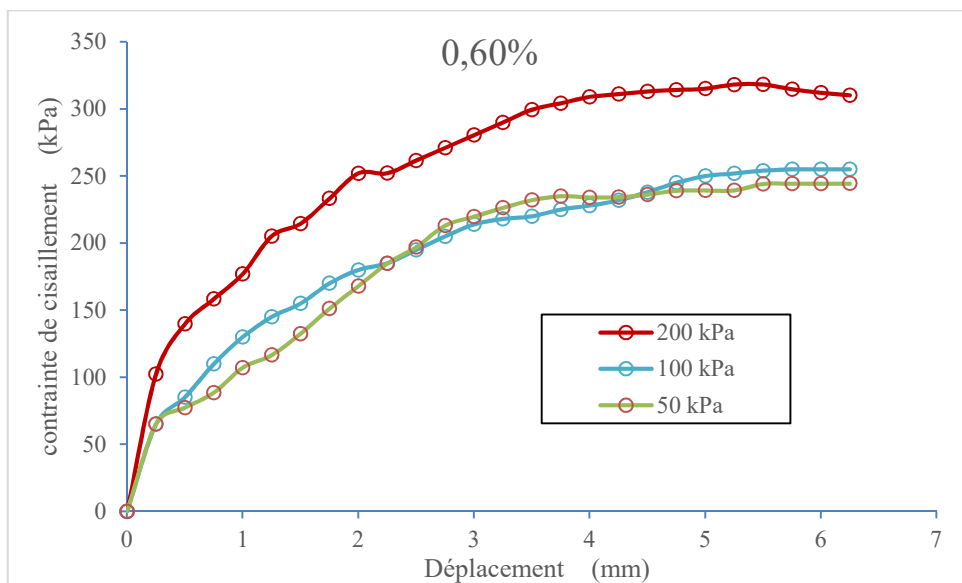


Fig. 4.6 Effet des fibres sur la contrainte de cisaillement

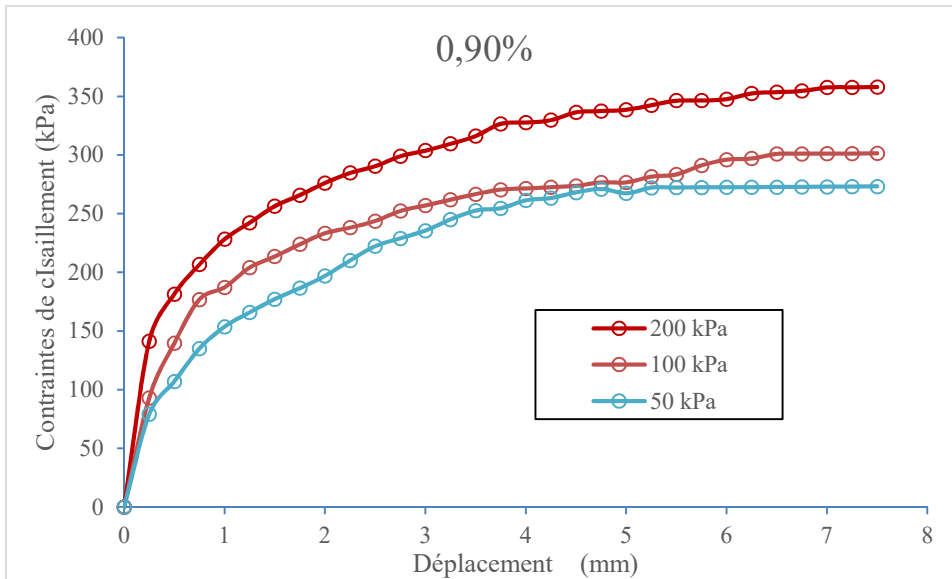


Fig. 4.7 Effet des fibres sur la contrainte de cisaillement

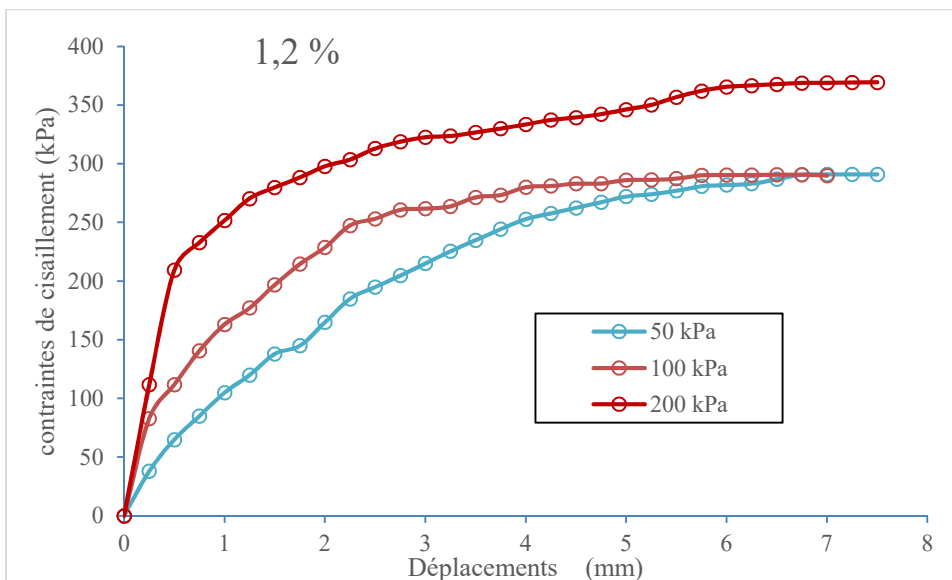


Fig. 4.8 Effet des fibres sur la contrainte de cisaillement

Tableau 4-6 Effet de sable sur les caractéristiques de cisaillement

% de sable	Contraintes de cisaillement (kPa)			Cu (kPa)	Φ_u°
	50	100	200		
0	149,512	177,992	196,399	140,31	16,39
10	102,832	219,412	261,367	147,29	43,23
20	184,721	235,433	273,661	162,49	31,27
30	155,705	132,034	215,555	111,51	34,44

Tableau 4-7 Effet des fibres PP sur les caractéristiques de cisaillement du mélange argile-sable traité à la chaux

% fibre	20% sable	Contraintes de cisaillement (kPa)			Cu (kPa)	Φ_u°
		50	100	200		
0,3		179,346	177,992	196,399	23,69	75,09
0,6		149,831	261,697	261,367	92,69	55,51
0,9		303,823	445,167	273,661	162,68	70,52
1,2		347,930	441,407	215,555	245,45	61,86

4.6 ESSAIS ŒDOMETRIQUES

L'effet de la stabilisation de l'argile de Sidi Hajres par la chaux et les fibres PP sur le comportement oedométrique.

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

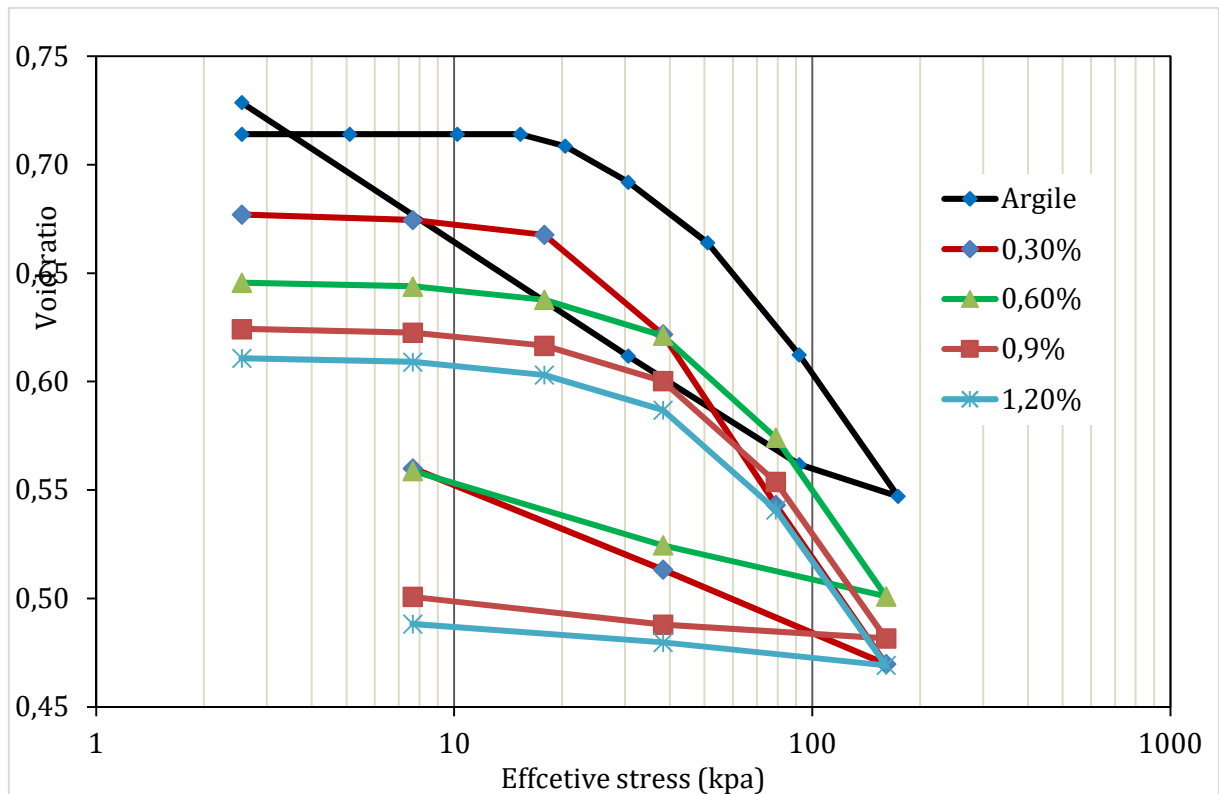


Fig. 4.9 Courbes oedométriques typiques _effet de fibres

Tableau 4-8 Effet des fibres PP sur les indices de compression et de gonflement.

FIBRE%	Cc	Cs
Sol Naturel	0.234	0.1072
Argile +0.3% de fibres PP	0.207	0,069
Argile +0.6% de fibres PP	0.193	0.037
Argile +0.9% de fibres PP	0.1904	0.0102
Argile +1.2% de fibres PP	0.1869	0.0169

Conclusion générale

Dans la présente étude, la faisabilité 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%. Il a été observé également que l'existence des fibres améliore considérablement les caractéristiques de cisaillement de l'argile, mais son effet est plus remarquable sur la cohésion que l'angle de frottement interne. A titre d'exemple, pour le sol contenant 1.2% des fibres PP, la cohésion et l'angle de frottement augmentent respectivement par 276,53% et 29,48% en comparaison avec l'argile brute. 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. De plus, elles participent également à la création d'une cohésion supplémentaire ce qui permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques du composite sol-fibres. Les résultats œdométriques montrent que les fibres PP participent à la réduction de la déformabilité de l'argile et réduire son caractère gonflant.

- Les résultats obtenus montrent également 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.
- L'association des fibres PP avec la chaux 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 l'ordre de 2860 kPa ce qui donne une augmentation de l'ordre de 700% en comparaison avec l'argile naturelle. En terme de résistance au cisaillement. Le traitement combiné chaux-fibres a donné un effet très remarquable sur la résistance au cisaillement.
- Les essais oedométriques montre que l'incorporation des fibres PP réduit sensiblement le caractère gonflant de l'argile, en effet les indices de compression et celui de gonflement diminuent avec l'ajout de la teneur en fibres PP.

En résumé, les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'utiliser séparément ou simultanément de différents agents de traitement pour stabiliser ou renforcer une argile connue par sa grande sensibilité à l'eau et son caractère gonflant élevé. Sur la base des résultats obtenus dans cette recherche, il est recommandé de limiter l'utilisation du sable à 20%. Cependant, en terme de concentration des fibres, les meilleures performances sont envisagées par le sol renforce par 0,9%. En fin, vu la spécificité de cette argile et sur tout 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.

Reference

Beddar, M., Meddah, A. and Belagraa, L. (2017) 'Feasibility of using fibrous waste in cement-based material', IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 246, p. 012034. doi: 10.1088/1757-899X/246/1/012034.

Benouadah, A., Beddar, M. and Meddah, A. (2017) 'PHYSICAL AND MECHANICAL BEHAVIOUR OF A ROLLER COMPACTED CONCRETE REINFORCED WITH POLYPROPYLENE FIBER', Journal of Fundamental and Applied. Available at: <http://jfas.info/index.php/jfas/article/view/1021> (Accessed: 9 May 2017).

CHAA, K. (2020) Etude de l'effet des fibres de polypropylène sur les caractéristiques de déformabilité d'une argile stabilisée. M'sila. Available at: <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/20595>.

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

Meddah, A. (2002) Comportement statique et cyclique d'un élément de terre armée. M'sila University.

Meddah, A. (2008) Etude du comportement d'un sable de dunes sous sollicitations triaxiales. M'sila University.

MEDDAH, A. (2021) Amélioration des sols. Université de M'sila.

Meddah, A. and Merzoug, K. (2017) 'Feasibility of using rubber waste fibers as reinforcements for sandy soils', Innovative Infrastructure Solutions, 2(1), p. 5. doi: 10.1007/s41062-017-0053-z.

Meddah, A. and Sahli, M. (2021) 'Pullout behavior of steel reinforcements used for mechanically stabilised structures', Mining Science, 28, pp. 47–58. doi: 10.37190/msc212804.

Meddah, A., Sahli, M. and Safer, S. (2015) 'Etude de l'effet de la rugosité des renforcements sur le comportement des massifs en terre armée', in Journées d'étude de Génie Civil. M'sila University, Algeria, pp. 54–59.

Moussaab, N. (2018) ETUDE DU COMPORTEMENT D UN SOL RENFORCE PAR DES

FIBRES.M'sila.Available at:<http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/6557>.

Djelouahi, hayet (2016) , Influence des fibres végétales sur les propriétés physico-mécanique d'un béton , universite m'Hamed bougara-boumerdes

Nassah Dalila , (2016), Influence de la quantité de fibres naturelles (alfa) et commerciales (polypropylène) sur les propriétés physicomécaniques des mortiers fibrés, universite m'Hamed bougara-boumerdes

dani ,S et missoui A,(2016), Etude physico-chimique de mortier de plâtre à base sable Renforcé de fibres synthétique et végétale, universite akli moand oulhadjé-bouira

Mohamed ,rissel (2017), Formulation et caractérisation d'éco-bétons renforcés aux fibres d'alfa pour des bâtiments verts et durables ,Université Ferhat Abbas Sétif 1

<https://hal.archives-ouvertes.fr/cel-01795523>