REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Thème

Effet des fibres polypropylène sur le comportement mécanique d'une argile traitée par la chaux

---

Présenté par

LALMAYA Chaimaa

ABDELGHANI Shaimaa

Proposé et Dirigé par

Dr : AMRI Salima

Promotion : 2023/2024


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciements

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

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

Nous exprimons nos vifs remerciements à tous les enseignants du département de Génie civil pour leurs aides, leurs encouragements et leurs conseils tout au long de notre cursus universitaire, qu'ils puissent trouver ici l'expression de notre profond respect.

Nous remercions également les membres du jury qui ont fait l'honneur d'apporter leur jugement critique sur cette étude :

Nous n'oublierons jamais à remercie Mr Faroudji, le directeur de laboratoire EPTRC d'avoir m'autorisé l'accès au laboratoire et aussi notre remerciements sont également à Adressés les ingénieurs et les techniciens du laboratoire, pour les nombreux services qu'ils nous ont rendus durant la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici le témoignage de nos remerciements les plus amicaux.

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

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chère Mère « Samya » et à mon cher Père « Mohamed »

en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités,

leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but.

A mes sœurs et frères

Amel et Sirène Sidaali, Yasser, Djamel.

A mes Chers amies

Imane, Bessma, Ahlam, Rahil, Imade, Yacine et Mounire.

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

A Mr Faroudji, le directeur de laboratoire EPTRC Avec les ingénieurs et les techniciens du laboratoire Zola, Hamza, Sid Ahmed, Rodwene, Chafika et Mohamed

A Toute la famille géotechnique Spécialement promotion (2023).

A ma binôme shaymaa.

Lalmaya chaimaa

Dédicace

Du profond mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,

À mon défunt grand père

Mon deuxième père « Ali », j'aimerais vraiment que tu sois là ces jours-ci... De vous nous avons appris la valeur de la science et de la volonté

À MES CHERE PARENTS

À mon cher père « Ibrahim » Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance, À la main invisible qui a enlevé les épines de mon chemin et qui a porté chaque instant de douleur Je suis passé à côté d'elle et elle m'a soutenu dans ma faiblesse et mon enjouement, ma mère « Karima » bien-aimée.

À MON MARI

La source de vie, d'amour, d'espoir et motivation Je te remercie pour tout Merci de m'avoir aidé à terminer ma carrière universitaire

À mon bébé qui n'est pas encore venu

À Mes frères Chamseldinne et Tajeddine source de joie et de bonheur

À Chaimaa chère amie avant d'être binôme

Abdelghani shaimaa

ملخص

تتميز التربة الطينية بخصائص جيوتقنية منخفضة مما تسبب مشاكل كبيرة ومكلفة للغاية، لهذا يتم استخدام تقنيات مختلفة لتحسين خصائص التربة الطينية مثل المعالجة الكيميائية والميكانيكية والفيزيائية. يعتبر معالجة الجير لهذه التربة حلاً مثاليًا واقتصاديًا لتثبيتها وهذا من خلال تحسين لخصائصها الجيوتقنية. عرفت دراسة تقوية التربة بالألياف بشكل متزايد من قبل الباحثين، من الناحية النظرية والعملية، بسبب مزاياها في تحسين خصائصها.

تهدف هذه الدراسة إلى دراسة إمكانية تثبيت طين بلاستيكي للغاية من منطقة وزره بولاية المدية بمعالجه مشتركة (الجير ألياف البولي بروبلين. يتكون الجزء التجريبي المتبع في هذه الدراسة علي مدي تأثير هذه المواد المضافة على السلوك الميكانيكي لهذه التربة (بروكتور، مقاومة معامل القص للضغط البسيط).

الكلمات المفتاحية: المعالجة، الطين، الجير، ألياف البولي بروبلين، الميكانيكا.

Résumé

Les sols argileux sont caractérisés par une faible propriété géotechnique qui causant des désordres considérables et très coûteuses. Diverses techniques sont adaptées pour améliorer les caractéristiques des sols argileux tell que traitement chimique , mécanique , physique . Le traitement par la chaux à ces sols peut apporter une solution idéale et économique pour les stabiliser et ceci par des modifications intéressantes de leurs propriétés géotechniques. 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. Cependant, cette étude vise à étudier la possibilité de stabiliser d'une argile très plastique provenant de la région de Ouezra wilaya de Médéa avec un traitement combiné (chaux et fibres de polypropène). Le protocole expérimental suivi consiste en l'étude de l'effet de ces additifs sur le comportement mécanique de ce sol (Proctor , paramètre de cisaillement résistance à la compression simple) .

Mots clés : Traitement, argile, chaux, fibres de polypropylène, mécaniques.

Abstract

Clay soils are characterized by a low geotechnical property which causes considerable and very costly disorders. Various techniques are adapted to improve the characteristics of clay soils

such as chemical, mechanical and physical treatment. Lime treatment of these soils can provide an ideal and economical solution to stabilize them and this by interesting modifications of their geotechnical properties. Reinforcement of soils with fibers has been increasingly studied by researchers, both in theory and in practice, because of its advantages.

However, this study aims to study the possibility of stabilizing a very plastic clay from the Ouezra wilaya of Médéa with combined treatment (lime and polypropene fibers). The experimental protocol followed consists of studying the effect of these additives on the mechanical behavior of this soil (Proctor, shear parameter, Compressive strength).

Keywords: treatment , clay, lime, polypropylene fibres, mechanics.

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 2

Chapitre I : *Généralité sur les argiles*

I.1 Introduction 4

I.2 Définition des argiles 4

I.3 Structure minéralogique des agriles 4

I.3.1 Unité structurale tétraédrique 5

I.3.2 Unité structurale octaédrique 5

I.4 Classification des argiles 6

I.5 Les principaux types de minéraux argileux 6

I.5.1 Kaolinite (type de feuillet T-O) 7

I.5.2 L'illite 7

I.5.3 Montmorillonite 8

I.5.4 Chlorite 9

I.6 Principaux caractéristiques des minéraux argileux 9

I.6.1 Capacité d'échange cationique (CEC) 9

I.6.2 Surface spécifique 10

I.6.3 Densité de charge spécifique 10

I.6.4 Attraction entre les minéraux argileux et l'eau 11

I.7 Les principaux problèmes des sols argileux 12

I.7.1 Retrait et Gonflement 12

a- Potentiel de gonflement 13

b- Pression de gonflement 14

c- Amplitude du gonflement 14

I.7.2 Tassement 18

I.7.3 Glissement 19

I.8 Conclusion **21**

Chapitre II : Techniques de traitement des sols

II.1 Introduction **23**

II.2 Traitement des sols **23**

II.3 Différents techniques des traitements des sols argileux **24**

II.3.1 Traitement mécanique **24**

II.3.2 Traitement à la chaux **26**

II.3.3 Traitement au Ciment **31**

II.3.4 Traitement physique **32**

II.4 Conclusion **39**

Chapitre III : Identification des matériaux

III.1 Introduction **42**

III.2 Matériaux utilisés **42**

III.2.1 Sol **42**

III.2.2 Chaux vive **43**

III.2.3 Fibres **44**

III.3 Méthodes expérimentales **45**

III.4 Préparation d'échantillon **46**

III.5 Caractéristiques géotechniques du sol étudié **47**

III.5.1 Caractéristiques Chimiques **47**

III.5.2 Caractéristiques physiques **49**

1-Limite de liquidité **51**

2-Limite de plasticité **52**

3-L'indice de plasticité **53**

4-L'indice de consistance **53**

III.5.3 Caractéristiques mécaniques **54**

III.6 Conclusion **59**

Chapitre IV : effet des fibres polypropylène sue les caractéristiques mécanique d'une argile traité par chaux

IV.1 Introduction **62**

IV.2 Plan de travail **63**

IV.3 Détermination du taux de demande en chaux par la méthode du Ph- mètre **64**

IV.4 Préparation des mélanges **65**

IV.5 Résulta et discussion **66**

IV.5.2 Effet de l'ajout de fibres de polypropylène sur les caractéristiques mécaniques d'une argile traitée **71**

IV.6 Conclusion 79

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux, d'après (Lepluart, 2002 cité par Belabbaci, 2014)……..……..……..10

Tableau III.1 : Propriétés chimiques des ajouts utilisés (d'après Harichane et al(2011)……44

Tableau III.2 : Propriétés physique des ajouts utilisés…….....…..……44

Tableau III.3 : Propriétés techniques de la fibre utilisée……..……..…….45

Tableau III.4 : Les différents essais effectués…….46

Tableau III.5 : Résultats de l'analyse chimique……...47

Tableau III.6 : Classification des sols en fonction du pourcentage……47

Tableau III.7 : Résultat de la valeur du bleu de méthylène……..…49

Tableau III.8 Qualificatif l'activité de la fraction argileuse selon le coefficient VBS……49

Tableau III.9 : Résultats d'analyse granulométrique par sédimentométrie……...….50

Tableau III.10 : Résultat des limites d'Atterberg……53

Tableau III.11: Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA-LCPC 1992)……..……...54

Tableau IV-1 : Résultat de la valeur du pH. ……..…….……64

Tableau IV.2 : L'angle de frottement et la cohésion après et avant de l'ajout de chaux…….69

Tableau IV.3 : Les résultats de compactage obtenus à partir de l'essai Proctor normal……..73

Tableau IV.4 : les caractéristiques de cisaillement obtenus……75

Tableau IV.5 : Les résultats de la résistance en compression simple obtenus avec 4% de chaux et les déférents pourcentages des fibres……..79

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma d'une couche de tétraèdre avec arrangement hexagonal (Holtzetal, 1991)……..…….....5

Figure I.2 : Structure en couche à base d'octaèdre (d'après Grim, 1959)……..……6

Figure I.3 : Kaolinite (Structure élémentaire de la Kaolinite (Djellali, 2018) à gauche ; Photographie au Microscope Electronique à Balayage de Kaolinite (Mitchell, 1976 cité par Bekhouche, 2018) à droite……..……7

Figure I.4 : Illite **(**Structure élémentaire de L'Illite (Djellali**,** 2018) à gauche ; Photographie au Microscope Electronique à Balayage d'Illite (Mitchell,1976 cité par Bekhouche, 2018) à droite……...……8

Figure I.5 : Montmorillonite **(**Structure élémentaire de la Montmorillonite (Djellali**,** 2018) à gauche ; Photographie au Microscope Electronique à Balayage de Montmorillonite (Mitchell, 1976 cité par Bekhouchek, 2018) à droite……..……9

Figure I.6 : Structure particulaire du chlorite…….……..……10

Figure I.7 : Schéma de molécule d'eau……..……..……12

Figure I.8 : Perte de verticalité des studios, provoquée par un gonflement différentiel du sol (Derriche et al, 1989)……...…….……...16

Figure I.9 : cas pathologique dans la ville de Saida (Houmadi, 2006) ……...……16

Figure I.10: Pathologie des maçonneries due aux variations volumiques du sol de fondation (Khemissaetal, 2007)…….....16

Figure I.11 : Déformation d'une chaussé sur un sol support gonflant dans la ville de Tébessa (Djellali et al 2012). …….....17

Figure I.12 : Dommage de gonflement dans la région d'Oum-Elbouaghi (Bekhoche, 2018)…… …….....…18

Figure I.13 : Vue générale de la batterie de silos Sadoui et al (2012)…….....19

Figure I.13 : a Glissement plan (Mécanisme de glissement plan) ; b Exemple de glissement, Algérie)…….....…20

Figure I.14 : Glissement rotationnel simple (a-Mécanisme de glissement rotationnel simple ; b Exemple sur RN 11, Damous, Algérie). …….....…….....20

Figure I.15 : Glissement rotationnel complexe…….23
Figure II.1 Effet du compactage sur la structure d'un sol, (Lambe, 1958 cité par Laibi, 2017)…….24

Figure II.2 : Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza, Algérie (Gadouri, 2017). 25

Figure II.3 : Densification d'un terrain par compactage dynamique (cas réel de l'aéroport deNice1978, France) (Gaafer, 2015). 26

Figure II.4 : Action de la chaux à court terme (modification par floculation)(Cabane, 2004).....26
Figure II.5 : Réaction pouzzolaniques (Marrot, 2010) cité par Nguyen (2015) 28
Figure II.6 : Epandage-malaxage de la chaux in-situ. 30
Figure II.7 : l'épandage de ciment-sol.....31
Figure II. 8 : Fibre de chanvre.....35
Figure II.9 : Fibres métalliques. 36
Figure II.10 : Fibres de polypropylène.....37
Figure II.11 : Structure de polypropylène (Tripathi cité par Rouag, 2014)…..38
Figure III.1 : Localisation du site étudie (Google Map)…….....42
Figure III.2 : Prélèvement de l'échantillon 28/2/2023…….....43
Figure III.3 : Chaux vive de wilaya de Saida.…….....43
Figure III.4 : Les fibres polypropylène.…….....45
Figure III.5 : Préparation d'échantillon..….....46

Figure III.6 : Analyse chimique..….....48

Figure.III.7 : Essai de bleu méthylèn.....49

Figure III.8 : Courbe analyse granulométrique par sédimentométrie.....51
Figure III.9 : Détermination de limite de liquidité.....52
Figure III.10 : Limite de liquidité. 53
Figure III.11 : Détermination de limite de plasticité.....54
Figure III.12 : Classification des sols selon Casagrande.....55
Figure III.13 : Réalisation de l'essai Proctor normale.....56
Figure III.14 : Courbe - Proctor normal….....57

Figure III.15 : Essai de cisaillement rectiligne à la boite….....58
Figure III.16 : Contraintes de cisaillement en fonction de déplacement horizontal.....58

Figure III.17 : Courbe contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale…….59

Figure III.18 : Essai Résistance à la compression simple……...60
Figure IV.1 : mesure de PH à l'aide de pH-mètre……...…64
Figure IV.2 : Variation de pH en fonction de la chaux……...…65
Figure IV.3 : Préparation de mélanges……...…65
Figure IV.4 : L'influence de la chaux sur les paramètres de Proctor normale……66
Figure IV.5 : Variations des paramètres de Proctor pour les mélanges (argile +chaux) densité sèche à gauche ; teneur en eau à droite…….67
Figure IV.6 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de déplacement…….67
Figure IV.7: Contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normal…….68
Figure IV.8 : Effet de la chaux sur l'angle de frottement et la cohésion…….69
Figure IV.9 : Evolution de la résistance en compression simple à 7 jours……..70
Figure IV.10 : Evolution de la résistance en compression simple à 14jours……...70
Figure IV.11 : Effet de la chaux et les fibres de polypropylène sur les paramètres de Proctor normale.....71
Figure IV.12 : L'influence de la chaux et les fibre PP sur la densité sèche…….72

Figure IV.13 : L'influence de la chaux et fibre PP sur la teneur en eau……..72
Figure IV.14 : l'influence de la chaux et les fibres sur la contrainte de cisaillement……..74
Figure IV.15 : contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale…….……75
Figure IV.16 : Effet de l'ajout de chaux et les fibres PP sur l'angle de frottement interne……76
Figure IV.17 : Effet de l'ajout de chaux et les fibres PP sur la cohésion……....76
Figure IV.18 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes traitées par 4% chaux à 7jours…….77
Figure IV.19 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes traitées par 4% chaux à 14jours……...78
Figure IV.20 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes traitées par 4% chaux à 7 et 14jours. ……...……...78

Introduction générale

Introduction générale

L'une des principales responsabilités des ingénieurs géotechniciens est la stabilisation des sols. Cette phrase fait référence à un ensemble de techniques pour améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques.

De nombreuses techniques sont utilisées en géotechnique pour améliorer le comportement des sols. Il peut être entièrement chimique ou mécanique ou physique

Le renforcement du sol est principalement réalisé en utilisant des composants résistants au linaire alignés précédemment (métalliques ou géosynthétitques) ou des éléments courts (fibres) dispersés aléatoirement. La résistance augmente autour du renfort dans la première approche, ce qui favorise l'émergence de plans de cisaillement au niveau des inclusions et, par conséquent, nuit à la stabilité locale et/ou globale de la structure, surtout lorsqu'il y a de nombreuses couches de renforts continus.

En raison de ses avantages, les chercheurs étudient activement le renforcement des sols à l'aide de fibres, tant en théorie qu'en pratique. L'utilisation de fibres dispersées aléatoirement, par opposition aux renforts linéaires, offre divers avantages, selon la recherche. Les fibres, par exemple, peuvent être facilement ajoutées au sol et mélangées, tout comme le ciment, la chaux ou d'autres méthodes de stabilisation additive.

Dans ce contexte, le principal objectif de ce mémoire est d'étudier l'effet de l'ajout de fibres de polypropène sur le comportement mécanique d'une argile traité à la chaux. Ce travail de recherche s'articule sur quatre chapitres à savoir

- **Le premier chapitre :** est présente une généralité sur les argiles et les différents types d'argile et leur caractéristiques ;
- **Le deuxième chapitre :** est consacré à la présentation les différentes techniques d'amélioration des sols ;
- **Le troisième chapitre :** décrit les protocoles expérimentaux ainsi l'identification et la caractérisation des matériaux étudies.
- **Le quatrième chapitre :** est présenté l'analyse de différents résultats expérimentaux de l'effets des fibres de polypropylène sur, les mécaniques d'un sol argileux traitée par la chaux.

Enfin, ce travail se terminer par une conclusion générale en rappelant les principaux résultats obtenus.

Chapitre I

Généralité sur les argiles

I.1 Introduction

Les argiles sont des matériaux sédimentaires de la couche superficielle de l'écorce Terrestre, obtenus par dégradation et altération par l'hydrolyse des minéraux des roches éruptives et magmatiques sous l'action physique et chimique des eaux de surface. Le terme argile possède différents sens qui ne se recouvrent que globalement. Il peut désigner des minéraux de structures et propriétés particulières, des roches argileux ses composées pour l'essentiel de ces minéraux ou bien la partie la plus fine d'une analyse granulométrique d'un sol meuble inférieur à 2 µm, cependant cette dernière sont des minéraux argileux résultant de la destruction des roches (les roches sédimentaires contiennent 50 %, les schistes 50 à 80 % et les roches éruptives donnent, par décomposition, des argiles). On dit qu'un sol est argileux s'il contient plus de 50% de minéraux argileux (Amroune, 2016).

Dans ce chapitre nous avons présentés une synthèse bibliographique sur les minéraux argileux qui constituent le plus grand pourcentage des minéraux recensés sur terre, leurs propriétés géométriques naturelles et leur structure élémentaire de base ainsi les comportements des sols argileux : Gonflement et retrait et aussi le mécanisme de gonflement en particulier, le tassement et le glissement .

I.2 Définition des argiles

L'argile se définit comme une terre grasse et molle contenant un ensemble de particules fines (de taille inférieure à 2 µm) constituée essentiellement de minéraux à structure en feuillets. Il n'existe pas de définition unique du terme « argile ». Le mot « argile » englobe deux connotations dont l'une liée à la taille des grains et l'autre à la minéralogie. La définition dépend de la discipline concernée. Le géologue ou le pédologue considère comme « argile » tout minéral de faible granulométrie, la limite étant fixée à 2 ou 4 microns selon les cas (Caillère et al, 1982). Les céramistes définissent l'argile comme une matière première qui, en présence d'eau, forme une pâte plastique qui durcit après cuisson (Voinovich, 1971). Un sol argileux est un sol fin, plastique et cohérent, actif sur le plan électrochimique et dont le comportement est très sensible à la présence de l'eau. L'influence de la proportion en argiles sur les propriétés du sol augmente avec la quantité d'eau. Lorsque la quantité d'argile excède 50% en masse, le comportement du mélange est gouverné par l'effet de l'argile (Khattab, 2007).

En géotechnique les sols sont classés suivant leur granulométrie tous sols dont le diamètre moyen est 20µm est dit sol argileux ce pendant les tailles des particules n'est pas suffisante pour dire que c'est une argile, il faut aussi que ce soit minéralogiquement un phyllo silicates (texture en feuillets).

I.3 Structure minéralogique des agriles

Les minéraux argileux se caractérisent principalement par une structure en feuillets dans la plupart des cas, d'où leur appellation de phyllo silicates. Ces feuillets sont constitués de deux types de couches, octaédrique et tétraédrique, dont les sommets sont occupés par les ions O^{-2} et OH^{-}Ces ions chargés négativement ont tendance à se repousser et forment une charpente où peut être logée des cations qui

assurent la stabilité électrostatique de l'ensemble de la structure. La représentation structurale des minéraux argileux peut être schématisée comme une unité qui associe un feuillet et un espace inter-foliaire. Généralement le feuillet est formé par deux types de couches (Kahlouche ,2022) :

I.3.1 Unité structurale tétraédrique

Est un élément de structure formé par quatre ions d'oxygène en fermant en leur centre un ion de silicium. Sa formule s'écrit $(SiO_4)^{-4}$. Schématiquement, une unité est représentée par un tétraèdre (Figure I.1). L'épaisseur de la couche est de 0,43 Å (Grim, 1968).

La couche tétraédrique est formée par ces unités structurales avec les bases des tétraèdres dans le même plan et les sommets dans le même côté le motif unitaire de la couche est $(Si_4O_{10})^{-4}$ et peut être répété infiniment.

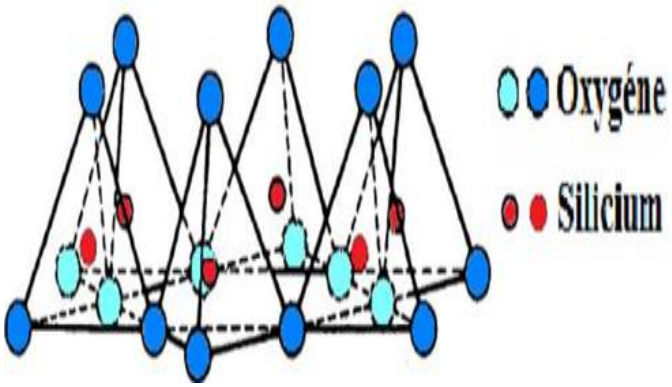


Figure I.1 : Schéma d'une couche de tétraèdre avec arrangement hexagonal (Holtzetal, 1991).

I.3.2 Unité structurale octaédrique

Est un élément de structure formé par six ions, hydroxyliques et/ou d'oxygènes, en coordination octaédrique, en fermant en leur centre un ion d'aluminium ou de magnésium
(Figure I.2). Elle est matérialisée par une cavité délimitée entre six sphères jointives de deux couches compactes d'hydroxyles et/ou d'oxygène. Les deux couches d'hydroxyles et/ou d'oxygène se superposent de telle sorte que le triangle équilatéral formé par les centres de trois sphères de l'une ait ses sommets opposés à ceux du triangle de l'autre. L'épaisseur de la couche est de 5,05 Å (Grim, 1968).

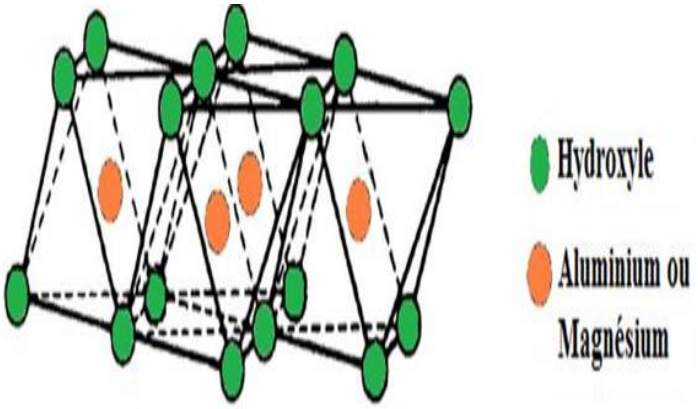


Figure I.2 : Structure en couche à base d'octaèdre (d'après Grim, 1959).

I.4 Classification des argiles

La minéralogie des argiles est largement étudiée depuis de nombreuses années et continue d'intéresser les chercheurs notamment la minéralogie des argiles inter stratifiées

Il existe en effet différents types d'argiles selon une classification basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet argileux. On distingue ainsi 3 groupes :

1. ***Les minéraux à d =7 Å (*TO ou 1 :1)**

Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique (T) siliceuse et d'une couche octaédrique (O) alumineuse ou magnésienne. Les couches liées par des liaisons hydrogène ont une distance fixe.

2. ***Les minéraux* (TOT ou 2 :1)**

Le feuillet fortement ou faiblement chargé est constitué de deux couches T tétraédriques siliceuses avec substitutions iso morphiques et d'une couche octaédrique alumineuse (ou magnésienne, ferreuse…) pouvant également être substituée. La distance inter feuillet est soit fixe, soit variable et des cations compensateurs de la charge sont présents dans l'inter feuillet soit K, soit Ca ou Na…respectivement.

3. ***Les minéraux à d=14 Å (TOTO ou 2 :1 :1)***

Le feuillet est constitué par une alternance de structures TOT et d'une couche octaédrique supplémentaire O⁻ dans l'espace inter feuillet. Cette couche est de nature gibbsitique Al(OH) ou brucitique Mg(OH). Cette couche ne partage pas de sommets (liaisons ioniques) avec les couches tétraédriques des feuillets 2 :1 qui l'entourent mais neutralise les charges du feuillet en question.(Duc, 2020).

I.5 Les principaux types de minéraux argileux

A partir des structures de base nous pouvons définir plusieurs familles d'argiles, selon le nombre de feuillets variable par particules et suivant le type d'argile considéré Précisons actuellement les propriétés principales des quatre grands groupes d'argile qui sont La kaolinite et la smectite et l'illite et enfin chlorite.

I.5.1 Kaolinite (type de feuillet T-O)

Dans le cas de la kaolinite, le feuillet est toujours neutre, di-octaédrique et alumineux, de composition (Si_2) (Al_2) O_5 $(OH)_4$ par une demi-maille (Figure I.3). Morphologiquement, la kaolinite se présente sous forme de particules hexagonales constituées par des empilements de feuillets. La faible capacité d'échange des kaolinites est due à des sites de surface amphotères. Dans ce cas, les liaisons interfoliées résultent de l'effet, compose de liaisons hydrogène et de forces d'attraction moléculaire, ce qui se traduit par un lien assez fort. Ainsi une particule de kaolinite sera constituée, par exemple, de quelques centaines de feuillets et pourra avoir une épaisseur de quelques dizaines de micromètres. Ces particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau.

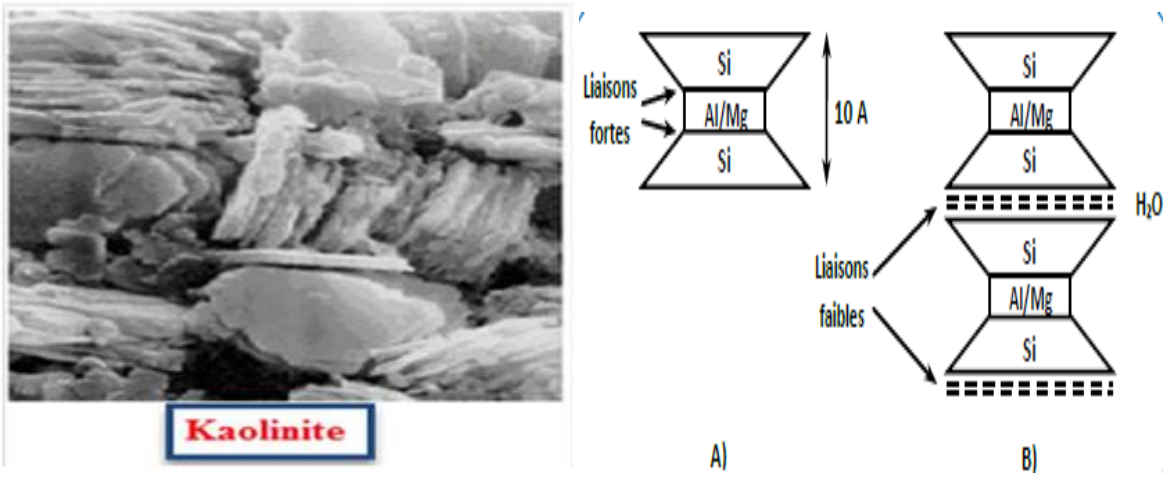


Figure I.3 : Kaolinite (Structure élémentaire de la Kaolinite (Djellali, 2018) à gauche ; Photographie au Microscope Electronique à Balayage de Kaolinite (Mitchell, 1976 cité par Bekhouche, 2018) à droite.

I.5.2 L'illite

Ce feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice (Figure I.4). Dans les couches de silice, un ion Si^{+4} sur quatre est remplacé par un ion Al^{+3} . Le déficit de charge qui en résulte est compensé par les ions potassium K^+ qui assurent des liaisons assez fortes entre les feuillets. La particule d'illite comportera, par exemple, une dizaine de feuillets et pourra avoir une épaisseur de quelques centièmes de micromètres. L'espace créé à l'intérieur du feuillet de silice est occupé par un ion K^+ qui par sa présence, induit un lien fort entre les couches.

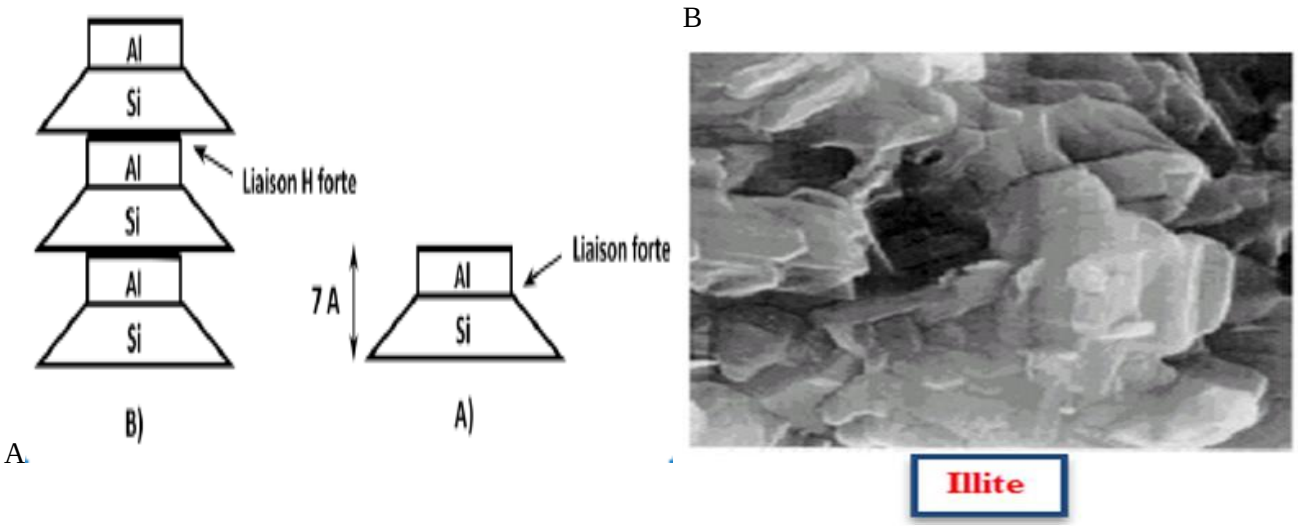


Figure I.4 : (A **:** Illite **(**Structure élémentaire de L'Illite (Djellali**,** 2018) ; B : Photographie au Microscope Electronique à Balayage d'Illite (Mitchell,1976 cité par Bekhouche, 2018).

I.5.3 Montmorillonite

Elle est formée de feuillets élémentaires constitués de deux couches tétraédriques placés de part et d'autre d'une couche octaédrique contenant des atomes d'aluminium (gibbsite) (Figure I.5). Elle porte parfois le nom de smectite. Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions Ca^{2+} (montmorillonite calcique) ou par des ions Na^{+} (montmorillonite sodique). La valence des ions sodium étant plus faible que celles des ions calcium, c'est la montmorillonite sodique qui aura la plus grande surface spécifique. Les liaisons entre feuillets étant très faibles, ces argiles sont très sensibles à la teneur en eau et ont un fort potentiel de gonflement. L'épaisseur d'une particule de montmorillonite peut- être très faible puisque, contrairement aux autres argiles, on peut isoler un feuillet élémentaire.(Saadi, 2017).

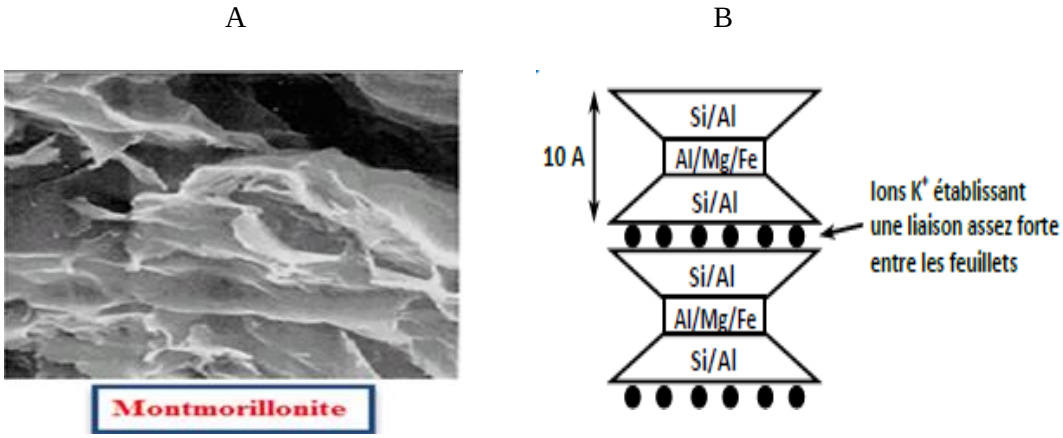


Figure I.5 : A : Structure élémentaire de la Montmorillonite (Djellali**,** 2018) **B :** Photographie au Microscope (Mitchell, 1976 cité par Bekhouchek, 2018)

I.5.4 Chlorite

Il est nécessaire de citer les chlorites du fait que leurs propriétés se rapprochent de celles des argiles. Leur structure est cependant plus complexe, et se compose de deux feuillets de micas entre lesquels s'insère un feuillet de brucite.

Le chlorite est relativement fréquente dans les sols argileux, elle est constitué d'une répétition des couches suivantes : un feuillet de silice, un feuillet d'alumine, un autre feuillet de silice et, finalement, un feuillet de gibbsite (Al) ou de brucite (Mg) (Figure I.6).On pourrait considérer comme un minérale, le chlorite peut aussi comporter plusieurs substitutions isomorphes et dans certain cas, perdre une couche de brucite ou de gibbsite. Étant donné que l'eau peut pénétrer entre les couches. Le chlorite peut être gonflant ; elle n'est cependant pas aussi active que la montmorillonite.

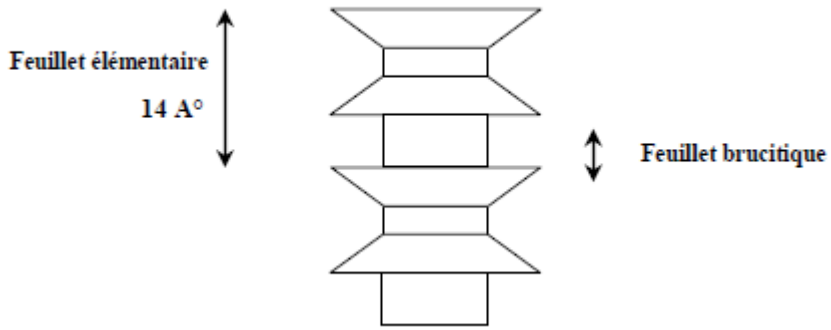


Figure I.6 : Structure particulaire du chlorite.

I.6 Principaux caractéristiques des minéraux argileux

Les propriétés donnant aux argiles des spécificités bien définies sont nombreuses, elles peuvent être physiques et chimiques. Les principales caractéristiques des minéraux argileux sont principalement représentées par les substitutions isomorphes, la capacité d'échange cationique, la surface spécifique et la densité de charge spécifique

I.6.1 Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique (CEC) est le nombre des charges positives compensent la charge superficielle, elle est généralement exprimée en milliéquivalents pour 100 grammes d'argiles et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler. Il existe de très nombreuses méthodes de détermination de la CEC, le plus utilisée en routine.

La méthode potentiométrique (méthode de Rouiller-Doirisse, 1974 et Thomas, 1982), un traitement aux résines déca ionisantes remplace tous les cations superficiels par des protons, l'échantillon devient alors

un acide faible titraille par une base forte diluée. Si la solubilité du minéral est faible dans la zone de ph considérée, la quantité d'ion (OH^-) ayant réagi avec les sites superficiels est égale à la charge négative (Decareau et al, 1990).

I.6.2 Surface spécifique

La surface spécifique d'une particule par définition c'est le rapport entre sa surface totale et son volume ou sa masse, on l'exprime généralement en (m^2 / kg).

$$surface\ spécifique = \frac{\text{surface}}{\text{volume}}\left(\frac{mm^2}{mm^3}\right)$$

La surface spécifique est composée de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace inter foliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé. Les caractéristiques de argiles sont résumées dans le tableau I.1 (Robert Holtez et al, 1981).

Tableau I.1 : Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux, d'après (Lepluart, 2002 cité par Belabbaci, 2014)

Minéraux	Surface interne (m^2/g)	Surface externe (m^2/g)	Surface totale (m^2/g)	CEC (milliéquivalent/ 100g)
Kaolinite	0	10-30	10-30	5-15
Illite	20-55	80-120	100-175	5-15
Montmorillonite	600-700	80	700-800	80-150
Vermiculite	700-400	40-70	760	100-150
Chlorite	….	100-175	100-175	10-40

I.6.3 Densité de charge spécifique

La densité de charge de surface noté « σ », et égale au nombre de cation compensateur par unité de surface. Elle peut évalue :

Lorsque les valeurs de la CEC et de la surface sont connues, la densité de charge «σ» s'exprime par :

$$\sigma\ (\text{meq/m}^2) = \frac{\text{CES}}{\text{S}}.$$

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux. L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux

argileux. Cette augmentation entraine l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur (Belabbaci, 2014).

I.6.4 Attraction entre les minéraux argileux et l'eau

De façon générale, l'eau n'a pratiquement pas d'influence sur le comportement des sols pulvérulents, par exemple, la valeur de la résistance au cisaillement d'un sable ne varie presque pas, qu'il soit sec ou saturé.

Il en va autrement pour les sols cohérant, dont le comportement peut être considérablement modifié par une variation de la teneur en eau. Quand le sol et sec, la cohésion entre les minéraux argileux est très forte, l'argile possède alors une résistance au cisaillement élevée et peut supporter de lourds charges sans se déforme. Si cependant ou augmente la teneur en eau, la cohésion diminue, de même que la résistance au cisaillement.

L'argile devient alors plastique et malléable. Si la teneur en eau continue de s'accroitre. L'argile devient très molle et à la limite, elle peut s'écouler comme un liquide épais, dans un tel cas la cohésion entre les minéraux argileux de même que la résistance au cisaillement sont pratiquement nulles. Ces changements de comportement sont attribuables aux caractéristiques des films d'eau adsorbée qui entourent presque toujours chaque minéral argileux. Ces films d'eau sont constitués de molécules d'eau fortement attirées par les surfaces des particules. (Robitaille et Tremblay, 1997).

Le film d'eau adsorbée et maintenu à la surface des minéraux argileux par des forces d'attraction qui agissent entre les molécules d'eau et les particules d'argiles. Ces forces et dépendent principalement des trois facteurs suivants :

1. L'activité électrochimique à la surface des minéraux argileux,
2. La polarité de l'eau,
3. Les cations présents dans l'eau.

I.6.4.1 Activité électrochimique à la surface des minéraux argileux

L'activité électrochimique de toute surface se manifeste par l'attraction qu'elle exerce sur d'autres particules chargées négativement ou positivement. Dans le cas des argiles, l'activité résulte de la présence, à la surface des particules, de charge négatives produites par les substitutions isomorphes, les surfaces recherchent une stabilité électrique ; elles attirent donc fortement les molécules dipolaires comme l'eau et les ions positifs appelés cation, contenus dans l'eau des sols.

I.6.4.2 Polarité de l'eau

La polarité d'eau est engendrée par la disposition des deux atomes d'hydrogène et de l'atome d'oxygène formant la molécule d'eau (Figure I.7). Bien qu'électriquement neutre cette disposition crée deux pôle un positif et un négatif, et les molécules d'eau sont attirées par la surface des minéraux argileux ou elles forment un film d'eau adsorbée.

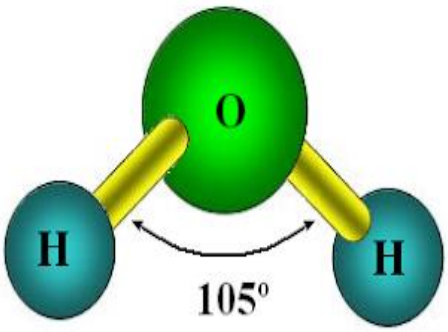


Figure I.7 : Schéma de molécule d'eau

I.6.4.3 Cations présents dans l'eau

Les cations sont attirés par les charges négatives à la surface des minéraux argileux. Se combinant avec les molécules d'eau, ils entrainent ces dernières et les maintiennent en contact avec les particules d'argile. La plupart des cations sont métalliques, et on trouve sous forme d'impuretés dans les eaux souterraines. Ceux que l'on rencontre le plus souvent dans l'eau des sols sont les cations de calcium (Ca^{+}) et de magnésium (Mg^{+2}). Les moins courants sont les cations de potassium (K) et de sodium (Na^{+}). Dans les sols acides, on trouve fréquemment des cations d'aluminium (Al^{+3}) et d'hydrogène (H^{+}). Les argiles d'origine marine se caractérisent par la présence de cations de sodium et de magnésium, le principal cation présent dans l'eau de mer (Houmadi et al, 2009).

I.7 Les principaux problèmes des sols argileux

I.7.1 Retrait et Gonflement

Le retrait-gonflement se manifeste dans les sols argileux, il est lié aux variations d'eau dans le sol. Lors des périodes de sécheresse, le manque d'eau entraine un tassement irrégulier du sol en surface (retrait). A l'inverse, un nouvel apport d'eau dans ces terrains produit un phénomène de gonflement. (M, chibbani)

Lorsque la teneur en eau augmente, on observe un phénomène de gonflement ;

Lorsque la teneur en eau diminue, on observe un phénomène de retrait-tassement.

Le retrait-gonflement est un phénomène qui concerne exclusivement les sols à dominante argileuse, bien que non dangereux pour l'homme, engendre chaque année sur le territoire mondiale des dégâts considérables aux structures, pouvant dépasser les millions d'euros cumulés. Ce phénomène est sans doute le plus dangereux et paradoxalement le moins connu. En tant que risque naturel d'origine climatique, Ce phénomène est immédiatement lié aux conditions météorologiques et particulièrement aux précipitations. Ce risque est constaté dès les années 1950.

Le phénomène du gonflement est désigné très complexe intervenir plusieurs paramètres, à cause de la structure minéralogique de l'argile, car en fonction de la structure particulière de certains minéraux

argileux, ce phénomène provoque des fissures plus ou moins importantes, de cette manière créée des désordres dans les ouvrages géotechniques. Notons que les sinistres peuvent survenir tant par retrait que par gonflement. Ces dernières sont la conséquence de la mauvaise prise en charge du mouvement du terrain. C'est pour cela, plusieurs ingénieurs sont souvent confrontés à des problématiques majeures comme l'instabilité des ouvrages dans plusieurs pays du monde. (Baghadir et Larouci. 2019).

I.7.1.1 Mécanisme de gonflement

Le gonflement d'une argile est le résultat d'une introduction de molécules d'eau entre les feuillets. Si la distance inter foliaire est supérieure à 3A° (dimension de la molécule d'eau), l'accès de l'eau est possible, les forces d'attraction entre les feuillets sont alors affaiblies du fait de la présence d'eau, c'est cet affaiblissement qui donne aux feuillets d'argile une tendance de s'éloigner les uns des autres en augmentant l'espace inter foliaire, qui provoque par conséquent le phénomène de gonflement. (Tessier ,1990 cité par Aissiou, 2010).

I.7.1.2 Gonflement au sens physico-chimique

Une particule d'argile possède normalement une charge négative due aux substitutions isomorphes, et afin que l'ensemble eau-argile acquière l'électro neutralité, des cations sont attirés à la surface de la particule d'argile. Ce pendant cette attraction est contrarié par la tendance des ions (cations et anions) à diffuser et à se distribuer d'une manière homogène dans l'eau. Le résultat de ces deux influences est un nuage d'ions entourant la particule.

Ce système peut être considéré comme une double couche électrique diffuse appelée double couche de Gouy-Chapman. Compte tenu de la structure ionique présentée précédemment, il apparaît d'importantes interactions physico-chimiques entre une particule argileuse et l'eau, généralement illustrées par le modèle de la double couche. Avec des hypothèses très précises, cette théorie permet de quantifier le phénomène de gonflement par rapport aux différents paramètres de l'eau (Aissiou, 2010).

I.7.1.3 Les paramètre du gonflement

Plusieurs méthodes de mesure du potentiel de gonflement des sols expansifs existent. La grande majorité d'entre-elles utilise l'appareil œdométrique comme outil principal d'essai. L'examen des procédures d'essais pour la mesure du potentiel de gonflement incite à considérer notamment les diverses définitions des paramètres de gonflement (Saadi, 2017).

a- Potentiel de gonflement

On définit le potentiel de gonflement, qu'on appelle aussi le gonflement libre, comme le gonflement relatif d'un échantillon de sol inondé et autorisé à gonfler librement sous une charge très faible. De nombreux auteurs avancent que le potentiel de gonflement d'un sol est égal au volume d'eau réellement absorbée par le sol pendant le gonflement. Seed en 1962 définit le potentiel de gonflement comme étant le pourcentage de gonflement d'un échantillon trempé dans l'eau sous une charge de 1 Psi dans une

cellule après être compacté à sa densité maximum et sa teneur en eau optimum dans un test de compactage standard.

b- Pression de gonflement

La pression de gonflement est la pression nécessaire pour ramener un échantillon à son volume initial après qu'il ait complètement gonflé. C'est la pression qui doit être appliquée à un sol pour qu'aucune variation de volume n'intervienne quand on le sature en eau.

c- Amplitude du gonflement

Le gonflement d'un sol, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale que provoque son imbibition sous un état de contraintes nulles .

I.7.1.4 Méthode de détermination des paramètres de gonflement

Les méthodes directes

L'appareil œdométrique est l'outil principal utilisé pour la mesure les paramètres de gonflement car l'état car l'état qui règne dans le moule œdométrique est proche de l'état du sol in situ.

Les principales méthodes expérimentales sont utilisées pour déterminer la pression de gonflement sont:

- Les essais de gonflement libre ;
- Les essais gonflement en parallèle ;
- Les essais de gonflement à volume constant.

Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes consistent à établir une corrélation entre le taux de gonflement ou la pression de gonflement et quelques paramètres géotechniques faciles à obtenir au laboratoire.

Ainsi, après avoir déterminé les paramètres géotechniques du sol, l'emploi de formules empiriques permet de connaître rapidement le potentiel de gonflement du sol, c'est-à-dire d'estimer ou de quantifier le gonflement et (ou) la pression de gonflement qui peuvent se développer en cas de variations des conditions hydriques et (ou) mécaniques. De nombreux auteurs ont tenté de relier la pression de gonflement σ ou le potentiel de gonflement CG aux paramètres classiques de mécanique des sols (teneur en eau Wl, densité sèche γd, limite de liquidité Wl, indice de plasticité IP, pourcentage des particules d'argiles (Saadi. 2017).

I.7.1.5 Conséquences dues au gonflement

Le sol gonflant est considéré comme l'un des sols les plus problématiques et il endommage diverses structures de génie civil en raison de son potentiel de gonflement et de rétrécissement lorsqu'il entre en contact avec l'eau**.** Plusieurs édifices ont été bâtis sur des sols gonflants sans que les précautions nécessaires pour ce type de cas du retrait-gonflements des sols soient prises. Il parait que pour certains

concepteurs, la prise en considération du mécanisme conduisant au gonflement des argiles constitue pour eux une étape secondaire.

L'examen des travaux publiés dans la littérature mondiale montre que l'on rencontre des problèmes de construction sur les sols gonflants dans les pays suivants : Afrique du sud, Algérie, Arabie Saoudite, Argentine, Australie, Azerbaïdjan, Botswana, Birmanie, Canada, Chine, Cuba, Égypte, Espagne, Éthiopie, France, Ghana, Grèce, Hongrie, Inde, Iran, Italie, Kazakhstan, Maroc, Mexique, Nigéria, Pakistan, Pologne, Portugal

Pour les pays du Maghreb, on remarque que l'existence des sols gonflants est signalée uniquement en Algérie et au Maroc, tan disque des cas pathologique sont été enregistrés même en Tunisie (Berthelot, 2002, Trabelssietal, 2002 et Khemakhemetal, 2002) cité par (Aissa Mamoune, 2002).

a- Cas des bâtiments

Les bâtiments et particulièrement les maisons individuelles construits sans précautions sur des sols gonflants présentent souvent des figures de dégradation telles que fissures des murs porteurs, voire des murs de remplissage, bombement de l'éventuel radier, etc. qui conduisent parfois à l'instabilité générale du bâtiment par rupture ou déboisement de ses éléments porteurs.

Ces désordres résultent du caractère différentiel que prennent les mouvements du sol de fondation (tassement ou gonflement) sollicitant la structure en flexion. Ces mouvements proviennent par ailleurs de l'hétérogénéité des sols de fondation, de celle des forces appliquées par la structure sur le sol, ainsi que des diverses perturbations que le bâtiment peut engendrer (Mouroux et al, 1987).

En Algérie, le constat est déjà relevé dans plusieurs régions à titre d'exemple au Sud-Est du pays (Ain-Aménas) , d'après les études de Derriche et al, 1989 (Figure I.8). On enregistre aussi un cas à Saïda (Sud-ouest d'Algérie, voir la figure I.9**)**, de nombreux projets fondés sur des motifs argileux qui ont des problèmes a montré des signes de dégradations telles que fissures dans les structures. Ces dégradations ont entraîné la destruction totale des bâtiments (Houmadi, 2006).

Des désordres importants y apparaissent fréquemment dans les constructions légères (pavillons, bâtiments de faible hauteur, routes) dans la wilaya de M'sila au Sud-Est d'Alger dans une zone à climat semi-aride. La figure I.10 présente des photos qui témoignent des dégâts occasionnés dans un établissement scolaire (Khemissa et al 2007).



Figure I.8 : Perte de verticalité des studios, provoquée par un gonflement différentiel du sol (Derriche et al, 1989).



Figure I.9 : cas pathologique dans la ville de Saida (Houmadi, 2006).



Figure I.10: Pathologie des maçonneries due aux variations volumiques du sol de fondation (Khemissaetal, 2007).

b- Cas de chaussée

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de teneur en eau sur le sol support. La pathologie subis par la chaussée se résume généralement à des fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur ses accotements s'il peut être attribué au climat et à la surcharge. Ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords.

Des auteurs (Djellali et al 2012) signalent que sur les routes nationales RN 10, RN 16 et la RN 82 de la ville de Tébessa qui se situe à l'Est de l'Algérie (Figure I.11), ont subit plusieurs opérations de réhabilitations de la chaussées, mais des dégradations demeurent toujours importantes (fissures, orniérages, carrelages, etc.…). Ces dégradations apparaissent en début de saison sèche, et engendrent des dépenses colossales dues au gonflement des sols support du chaussée.

Des désordres importants à la structure de la chaussée ont été observés sur les chaussées dans la région d'Oum-Elbouaghi (voir Figure I.12) qui située dans la partie nord-est de l'Algérie Le désordre subis par la chaussée se résume généralement à des fissures due à le gonflement et le retrait d'un sol support (Bekhoche, 2018).

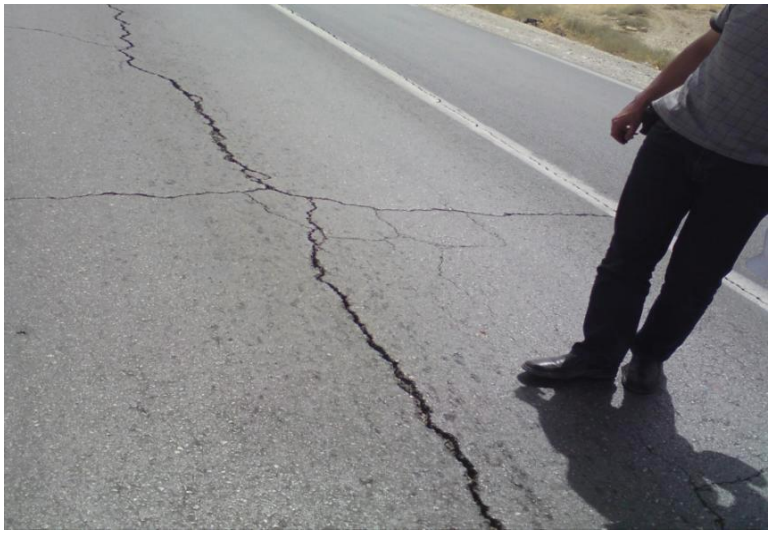


Figure I.11 : Déformation d'une chaussé sur un sol support gonflant dans la ville de Tébessa (Djellali et al 2012).



Figure I.12 : Dommage de gonflement dans la région d'Oum-Elbouaghi (Bekhoche, 2018).

I.7.2 Tassement

Les sols fins saturés tels que les argiles et les limons sont caractérisés par une faible perméabilité, ce qui fait que sous l'effet d'une surcharge transmise par les fondations au sol, l'eau interstitielle s'infiltre lentement et le volume du squelette granulaire diminue. La réduction du volume se traduit par un tassement du sol qui évolue au fur et à mesure que l'écoulement de l'eau se manifeste. On parle alors d'un tassement du sol par consolidation. La consolidation primaire d'un sol fin saturé correspond au tassement au fur et à mesure de l'évacuation de l'eau interstitielle, sous l'effet de la surpression interstitielle Δu créée par une pression appliquée au massif. (Ben Oudina et Dahou, 2021). Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place.

-Le tassement uniforme : les tassements uniformément repartis affectent peu la structure, les mouvements qui en résultent peuvent cependant endommager les services et accessoires, les conduites d'eau et les passages souterrains

-Le tassement différentiel : est un mouvement d'enfoncement du sol qui n'est pas uniforme. Il peut de ce fait provoquer des dislocations des maçonneries comme l'apparition de fissures. C'est un grave facteur de désordre qui est la plupart du temps irrémédiable.

Dans ce cas on peut de citer le cas de tassement des silos métallique à wilaya de Bejaïa, l'ouvrage est constitué de 10 silos métalliques de capacité totale de 76000 tonnes destinés pour le stockage de produits céréaliers (Figure I.13**)**. Il a été réalisé en 2004 et mis en exploitation au mois de mars 2006.Les silos ont été fondés sur un radier général en béton armé de dimensions 119,4 m x 49 met de 75 cm d'épaisseur (Sadoui et al ,2012).



Figure I.13 : Vue générale de la batterie de silos Sadoui et al (2012).

I.7.3 Glissement

Les glissements de terrain sont des phénomènes naturels. Se produisent dans les circonstances très variées, ils affectent des ouvrages construits par l'homme ou des pentes naturelles. Il se produisent soudainement ou durent plusieurs mois, voire parfois plusieurs années la rupture affecte une forme vaguement circulaire ou bien au contraire ne présente aucune caractéristique géométrique particulière. la rupture se produit sous l'action mécanique d'un écoulement d'eau ou parce que le terrain a été progressivement lessivé par une eau pauvre en cation .On pourrait multiplier les exemples et montrer combien la morphologie des glissements présente d'aspects divers tant dans les milieux pulvérulent que dans les milieux cohérant.(Baghdir et Larouci, 2019). On observe des glissements de formes variées, notamment :

I.7.3.1 Glissement plan

Dans le cas des glissements plan, la surface de glissement est plane. Une couche ou un ensemble de couches de terrain se mettent en mouvement le long d'une couche plus faible ou une discontinuité lithologique ou structurale, un niveau marneux ou argileux est un exemple fréquent de couche de mauvaise résistance Comme l'illustre la figure (I.13).



a b

Figure I.14 : a Glissement plan (Mécanisme de glissement plan) ; b Exemple de glissement, Tizi Ouzo Algérie).

I.7.3.2 Glissement rotationnel simple

C'est le type de glissement le plus fréquent, où la surface de rupture est approximativement circulaire (Figure I.14), il se produit généralement dans les terrains meubles et homogènes.



a **b**

Figure I.15 : Glissement rotationnel simple (a-Mécanisme de glissement rotationnel simple ; b Exemple sur RN 11, Damous, Algérie).

I.7.3.3 Glissement rotationnel complexe

Comme son nom l'indique, c'est un glissement compliqué qui se manifeste sous forme de surfaces multiples (emboités), les unes dans les autres, dues à des glissements en chaine. Les zones de flysch, les schistes marno-calcaire ou les schistes métamorphiques sont les formations les plus sujettes à ce genre de glissement. Voir la figure ci-après.

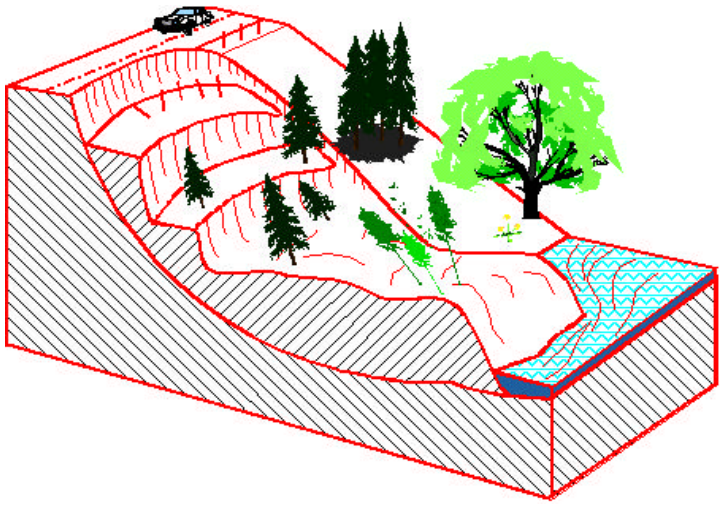


Figure I.16 : Glissement rotationnel complexe

I.8 Conclusion

- Les matériaux argileux, sont très fréquents et couvrent une partie considérable du globe terrestre. Les dommages provoqués par le gonflement des sols argileux présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles. La maîtrise du phénomène de gonflement demande de grandes connaissances afin de minimiser les dégâts occasionnés par ce phénomène sur les différents ouvrages construits en formations argileuses. On dispose de différentes solutions parmi lesquelles on peut relever :
- Le changement de site ;
- Le remplacement des sols gonflants par un matériau non gonflant ;
- La protection du sol gonflant vis à vis des accès d'eau.

La prévention du gonflement par un chargement approprié, et ainsi le calcul des structures de manière à ce qu'elles puissent supporter les pressions de gonflement susceptibles de se développer.

Enfin la stabilisation du sol gonflant par un traitement approprié, C'est le but de notre travail de recherche. Dans le chapitre qui suit, nous décrirons les différentes méthodes du traitement des sols argileux permettant d'améliore leur comportement mécaniques et physiques par la suite réduire le nombre des dégâts.

Chapitre II

Techniques de traitement des sol

II.1 Introduction

Le traitement des sols est généralement opéré pour rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour son emploi par exemple en tant que support d'une chaussée, d'un parking, d'une plate-forme industrielle, etc. Cette technique est économique et écologique qui permet de rendre apte à l'usage des matériaux qui ne l'étaient pas. La technique s'inscrit ainsi dans la démarche environnementale du développement durable en préservant les ressources naturelles des produits de carrières, et en valorisant les matériaux du site par leur réutilisation. Pas de transport de matériaux, ni de dépôt, donc diminution du cout. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Le choix de l'une de ces techniques dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement. Un sol argileux de faible résistance et sensible à la variation de la teneur en eau et présentant des nombreux phénomènes de retrait/gonflement et du tassement sont des cas où un traitement est également envisagé. Il est en effet nécessaire de traiter ces types de sols pour augmenter leur résistance, compacité et leur plasticité et par conséquence réduire leurs potentielle de gonflement, ainsi que pour diminuer leur sensibilité aux variations de la teneur en eau. Dans ce chapitre nous allons présenter une synthèse bibliographe sur les différentes techniques d'amélioration des sols argileux qui sont actuellement et le plus utilisées en domaine géotechnique.

II.2 Traitement des sols

Le traitement des sols regroupe l'ensemble des techniques permettant d'améliorer les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques, des sols. Elle doit permettre d'améliore la résistance à la compression sèche et humide, à la traction et au cisaillement et la diminution de la porosité ; la diminution du retrait - gonflement et l'obtention d'une meilleure cohésion ; l'amélioration de la résistance à l'érosion

On distingue trois principales techniques de traitement de sol qui sont :

- Traitement mécanique ;
- Traitement chimique ;
- Traitement physique.

II.3 Différents techniques des traitements des sols argileux

II.3.1 Traitement mécanique

Le traitement mécanique est pratiquée lorsqu'on procède à la densification d'un sol par compactage. Elle a pour effet la diminution de la porosité de la terre. Le compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées, cependant ces matériaux restent très sensibles à l'eau. Mis au contact avec l'eau, les matériaux redeviennent plastiques et ne résistent plus du tout à la compression. C'est pourquoi le compactage est un moyen de stabilisation généralement associé à d'autres méthodes telles que la stabilisation chimique. Il est le plus souvent influencé par trois caractéristiques : le mode, l'énergie et la granularité de la terre.

II.3.1.1 Mode de compactage

On distingue essentiellement quatre principales méthodes de compression : la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact et la compression par pétrissage. À chacune de ces méthodes de compression correspond un mode de production ou de mise en œuvre du matériau terre.

II.3.1.2 Contrainte de compactage

Quels que soient le type de terre et la méthode de compactage utilisé, une plus grande énergie de compactage diminue la teneur en eau optimale, et conduit à une plus grande densité sèche, comme lemontre la Figure II.1 Toutefois, de trop fortes énergies de compactage peuvent produire des phénomènes annexes nuisibles à la qualité du matériau. Ainsi, à la presse, les très fortes pressions peuvent produire un laminage des blocs fabriqués (Laibi, 2017).

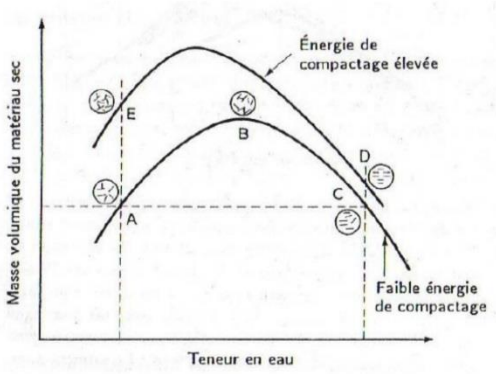


Figure II.1 Effet du compactage sur la structure d'un sol (Lambe, 1958 cité par Laibi, 2017).

II.3.1.3 Les types de compactages

1. **Compactage de surface**

Le compactage est la densification des sols par application d'énergie mécanique en vue d'améliorer les propriétés géotechniques des sols (Figure II.2). La densité obtenue après compactage dépend de la teneur en eau du sol. En effet, la masse volumique sèche du sol augmente avec la teneur en eau jusqu'à un

optimum, puis elle décroit avec l'augmentation de la teneur en eau. Donc il est important de déterminer cet optimum pour obtenir des sols suffisamment denses (Gadouri, 2017).



Figure II.2 : Stabilisation par compactage de surface (Cas d'une digue de barrage en terre de Kef-Eddir construit à Tipaza, Algérie. (Gadouri, 2017).

2. Compactage dynamique

Le compactage dynamique permet de densifier les sols à grande profondeur sous l'effet d'impacts de forte énergie obtenus par la chute d'une masse sur la surface à compacter. Le principe de base consiste à transmettre des chocs de forte énergie à la surface d'un sol initialement compressible et de faible portance afin d'en améliorer en profondeur les caractéristiques mécaniques. Le pilonnage est associé à un contrôle géotechnique particulhyièrement intensif de manière à atteindre le plus rationnellement possible le but recherché.

Cette technique est applicable dans tous les types de sols à comportement granulaire. Il s'applique particulièrement bien aux remblais hétérogènes ainsi qu'aux terrains de composition variable. Il peut s'appliquer aussi bien à des sols non saturés qu'à des sols situés sous la nappe.

En pratique, la technique consiste à laisser tomber en chute libre ou en quasi-chute libre, d'une

hauteur de 10 à 30 mètres, une masse pesant de 10 à 35 tonnes (Figure II.3). Les impacts sont répétés selon un maillage défini en fonction du site à traiter et du futur ouvrage. Les paramètres du compactage, à savoir l'espacement entre les impacts, le nombre de coups par impact, le nombre de Passes de compactage...etc., sont déterminés sur site en fonction des différents essais de contrôle (essais de calibration, mesures de tassements, contrôles des caractéristiques mécaniques du sol par essais in situ...etc.) (Gadouri, 2017).



Figure II.3 : Densification d'un terrain par compactage dynamique (cas réel de l'aéroport deNice1978, France) (Gaafer, 2015).

II.3.2 Traitement à la chaux

Le traitement des sols à la chaux est une technique connue depuis plusieurs siècles, avec par exemple la construction de la grande muraille de Chine ou encore les habitations romaines construites avec de la chaux. L'utilisation de la chaux peut modifier presque tous les sols à grain fin, dans une certaine mesure, mais l'amélioration la plus spectaculaire se produit dans les sols argileux de plasticité modérée à élever. La modification survient principalement en raison de l'échange de cations calcium apportés par la chaux éteinte et des cations normalement présents absorbés à la surface de l'argile. La modification découle aussi de la réaction de la chaux éteinte avec la surface argileuse dans un environnement au pH élevé ; la minéralogie de la surface argileuse est altérée lorsqu'elle réagit avec les ions de calcium pour former des produits cimentaires. Il en résulte une réduction de la plasticité et du gonflement ainsi que de la capacité de rétention de l'humidité, et une plus grande stabilité.

II.3.2.1 Mécanisme de traitement à la chaux

- **L'échange cationique**

L'ajout de la chaux à un sol argileux a un effet immédiat sur les propriétés de celui ici. Il y a libération des ions Ca^{2+} produits par la chaux en présence d'eau (équation 1 et 2), et ceci s'accompagne d'une augmentation du pH du sol. Il se produit un échange cationique entre les ions métalliques liés aux surfaces des particules argileuses et les ions Ca^{2+} produits par la chaux. La valence et la taille de l'ion jouent un rôle primordial dans cette réaction d'échange cationique. Les cations de valence élevée remplacent facilement ceux de faible valence. Pour des cations de même valence, le plus gros peut être facilement remplacé, On peut donc dresser une liste des cations par ordre approximatif de capacité de remplacement. Cet ordre dans la réalité dépend du type d'argile, de la nature des cations à remplacer et de la concentration des ions dans l'eau.

Cette action entraîne une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant d'une diminution de la limite de liquidité. Cette évolution provoque un déplacement du domaine de plasticité vers les teneurs en eau plus importantes. Le décalage de l'indice de plasticité est lié à la quantité de chaux utilisée (Younoussa, 2008).

$$CaO + H_2O \rightarrow (OH)_2 + 1155kJ \qquad \text{Equation 1}$$

$$(OH)^2 \rightarrow Ca^{+2} + 2(OH) - 1 \qquad \text{Equation 2}$$

- **Floculation**

L'ajout de chaux à des grains fins d'argiles cause une floculation et une agglomération des particules. Ce phénomène a comme résultat d'un changement apparent dans la texture, les petits grains se regroupent pour former d'autres grains de grande taille. Donc, la floculation d'argile augmente la grosseur effective des grains et joue un rôle important dans la stabilisation.

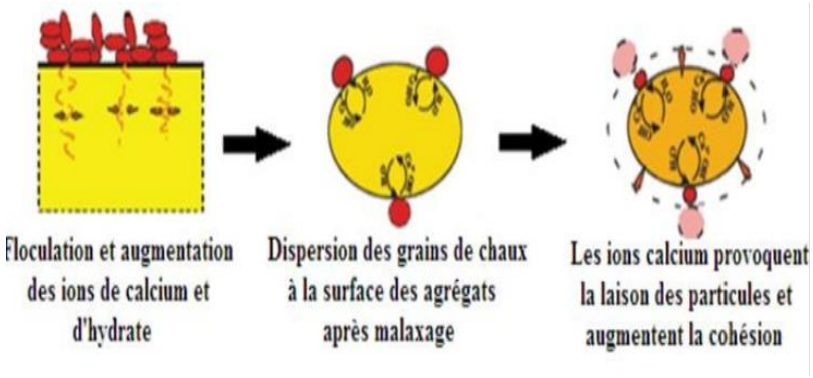


Figure II.4 : Action de la chaux à court terme (modification par floculation) (Cabane, 2004).

- **Carbonatation**

La chaux réagit avec le dioxyde de carbone de l'air (CO_2) pour former de faibles agents de cimentation comme les carbonates de calcium par exemple (CaCO, MgCO) selon le type de chaux utilisée. Généralement, on essaie de réduire ce phénomène par compactage du sol traité après une petite durée de malaxage. Des études ont monté que cette réaction est probablement plus nuisible qu'utile dans la stabilisation des sols.

- **Réaction pouzzolanique**

Les réactions pouzzolaniques se produisent à long terme Cette réaction se produit entre la silice ($SiO2_2$) et/ou l'alumine (Al_2O_3). Cela conduit à la formation des phases minérales composées des silicates de calcium hydratés (CSH) voir (FigureII.5), des aluminates de calcium hydratés (CAH) et des alumino-

silicates de calcium hydratés (CASH) (selon les Équation 3 et Équation 4). Le résultat de ces réactions donne la part la plus importante dans l'augmentation de la résistance du mélange sol- chaux et les propriétés acquises par le sol peuvent durer des années. Ces réactions sont plus ou moins lentes mais concourent à l'augmentation des performances mécaniques des sols.

$(OH)_2 + SiO_2 + H_2O \rightarrow CSH$ *(calcium silicate hydrate)* *Équation 4*

$(OH)_2 + Al_2O_3 + HO \rightarrow CAH$ *(calcium aluminate hydrate)* *Équation 5*

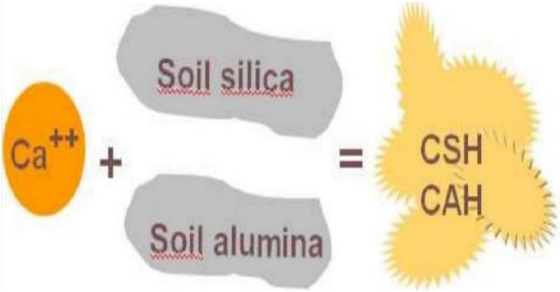


Figure II.5 : Réaction pouzzolaniques (Marrot, 2010) cité par Nguyen (2015).

La cinétique de ces réactions est influencée par plusieurs facteurs :

-La température du milieu: plus la température est élevée, plus la prise est rapide. Cependant, au-dessus de 45°C, les produits de la réaction sont dénaturés. La prise est ralentie voire arrêtée lorsque la température est inférieure à environ 4°C, et reprend lorsque la température commence à s'élever à nouveau.

-La quantité et la nature de la fraction argileuse : c'est la fraction argileuse du sol, constituée de phyllo silicates d'aluminium, qui réagit avec la chaux. Tous les minéraux argileux sont attaqués par la chaux, mais ceux qui ont la plus haute teneur en silicates disponibles réagissent plus fortement. Ainsi, la structure en trois couches de la montmorillonite expose des silicates des deux côtés du feuillet, de manière à ce qu'une montmorillonite subisse des réactions plus vite qu'une kaolinite composée de deux couches, parfois avec un décalage de plusieurs semaines dans le cas de la recombinaison pouzzolaniques. Néanmoins, une surface de silicates «disponibles» est attaquable si elle n'est pas reliée à une autre surface similaire par des ions qui ne sont pas facilement échangeable comme c'est le cas dans l'illite et le chlorite.

II.3.2.2 Effets de la chaux sur les propriétés géotechniques des sols argileux

Les travaux de recherche réalisée sur les sols argileux. Le traitement des sols argileux par la chaux en vue d'améliorer leurs comportements physiques et mécaniques se sont basés principalement sur des expériences physiques et mécaniques en laboratoire a été réalisé par de nombreux auteurs . Ils ont

constaté que l'ajout de divers pourcentages de chaux entraînait une amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques.

(Aissiou, 2010) a travaillé sur deux types d'argiles traités à la chaux à différents (1% ;2% ;3% et 4%.) , il a montré une diminution des valeurs de la limite de liquidité avec une augmentation de la quantité de chaux ajoutée, donc pour un ajout de 1% de chaux aux deux sols argileux la diminution est environ de 3% à 5% des limites de liquidité initiaux ensuite cette diminution commence à devenir régulière à partir de 3% de chaux . Cette variation de la limite de liquidité est due à la diminution de la surface spécifique totale du mélange (sol argileux + chaux) puisque il y'a des variations de la fraction argileuse.

(Hotineanu et al, 2015) Ont mené une investigation expérimentale sur deux sols (bentonite et kaolinite) sont mélanges avec des différents teneur en chaux. Ils ont étudié la variation de gonflement et la résistance à la compression simple initialement, la bentonite non traitée présentait une pression de gonflement de 995 kPa, alors que la kaolinite non traitée présentait une pression de gonflement de 360 kPa. Ils ont trouvé que La pression de gonflement est devenue négligeable à 3% de chaux pour la kaolinite et 5% pour la bentonite (par rapport à la masse sèche du sol), respectivement. Ils ont tiré aussi que l'ajout de chaux améliore la résistance à la compression simple des sols argileux.

(Bourokba Mrabent et al 2015) Ont étudié l'effet de l'ajout de chaux (0 % ; 2% ; 4% ; 6 ; % et 8%) sur les propriétés géotechniques d'un sol argileux. Cette étude montré que l'ajout de chaux produit une réduction de l'indice de plasticité , potentiel de gonflement et de la pression de gonflement avec l'augmentation de la teneur en chaux , Cette étude a montré aussi que la densité sèche maximale de sol traités réduit avec l'augmentation de la teneur en chaux. D'autre part, la teneur en eau optimale de sol a augmenté avec l'augmentation de la teneur en chaux.

Des essais en laboratoire ont été effectués par (Cheng et al, 2018) pour évaluer l'influence de chaux sur les propriétés physico-mécaniques d'un sol provenant de la région de Nairobi, au Kenya. Ces essais de laboratoire comprenaient les limites d'Atterberg, l'indice de CBR (California Bearing Ratio). Ils sont ressorti des résultats obtenus que le traitement à la chaux amélioraient considérablement les propriétés physico-mécaniques du sol étudié. En effet de 1% à 9% de chaux a permis de réduire l'indice de plasticité de 30.7% à 8.3 % et augmente la limite de plasticité de 33,6% à 50%. Ainsi , ils ont constaté qu' il y a une influence de l'ajout de chaux sur l'indice de CBR .La Valeur de l'indice de CBR augmente de 1,6 % à 25,2 % à l'ajout de 9 %.

L'ajout de la chaux engendre une augmentation de la résistance la compression simple d'un sol argileux (Ali, et Mohamed2018). Ils ont notés l'effet du pourcentage et le temps sur l'évolution de cette caractéristique .la résistance de l'argile non traitée est passée de 0,525 MPa à1,35, 1,30, 1,30, 1,30 et 1,25 MPa avec 5, 7, 9, 11 et 13% de chaux respectivement. Cette augmentation de la résistance dans les caractéristiques de l'argile dus à l'interaction rapide entre la chaux et argile en présence d'eau.

II.3.2.3 Exécution du traitement à la chaux in situ

1-réparation du sol

Il s'agit d'une scarification dont le but est soit d'éliminer de gros éléments susceptibles d'entraver le malaxage, soit de permettre la modification de l'état hydrique du sol par aération ou humidification.

2-Épandage

La technique de l'épandage "au sac" sur des plates formes préalablement quadrillées peut être envisagée pour des chantiers de surface très limitée (< 250 m²) ou de géométrie complexe. Dans les autres cas, la répartition de la chaux est réalisée à l'aide d'un épandeur à dosage pondéral, équipé en général d'un dispositif asservi à la vitesse du véhicule.

3-Malaxage

Cette opération a pour but de faire foisonner le sol, et d'y incorporer la chaux de façon homogène. En fonction de la nature du sol, de la taille et du type de chantier, il est exécuté à l'aide de pulvimixers, de roto bêches, de charrues à disques ou à socs. Pour les chantiers de faible importance, du matériel de type agricole peut être utilisé.

4-Compactage

Le compactage des matériaux traités intervient après un éventuel nivellement en couches d'épaisseur compatible avec les performances des compacteurs, qu'ils soient à pneus, vibrants ou à pieds dameurs**.** En période de climat chaud et en cas de sol humide, il est recommandé de réaliser le compactage 2 à 4 heures après le malaxage, afin que la chaux vive ait le temps d'assécher le sol au maximum. Lorsqu'il y a risque de pluie, il est recommandé de fermer le sol avant toute précipitation. Si on ajoute des grandes quantités de chaux dans le but d'obtenir des performances élevées à jeune âge, il convient également de contrôler l'état hydrique du sol.



Figure II.6 : Epandage-malaxage de la chaux in-situ.

II.3.3 Traitement au Ciment

L'action principale recherchée avec l'ajout du ciment est l'amélioration des performances mécaniques. Les réactions ciment-sol qui engendrent cette amélioration des performances mécaniques. Les produits cimentaires utilisés pour le traitement des sols se présentent sous deux formes :

Soit des liants hydrauliques routiers (NF P15-108), soit sous forme de ciment (CEM I à V) (NF EN 197-1, 2001). La classification des ciments (CEM I à V) dépend de la proportion des composantes principales. Ces composantes principales peuvent être : le Clinker, les laitiers de hauts-fourneaux, les cendres volantes, la pouzzolane naturelle, le calcaire, les schistes calcinés et la fumée de silice (Mehenni, 2015).

La stabilisation au ciment s'utilise pour la superstructure que pour l'infrastructure et autres travaux de terrassement (Figure II.7), particulièrement lorsqu'il est prévisible que les couches mises en place seront soumises à de fortes sollicitations.



Figure II.7 : l'épandage de ciment-sol.

II.3.3.1 Réactions ciment-sol

Le ciment courant est constitué de composants anhydres dont les principaux sont : l'alite ou silicate tricalcique $(3CaO\ SiO)_2$ noté C_3S, la bélite ou silicate bicalcique $(2CaO\ SiO)_2$ noté C_2S, l'aluminate ou aluminate tricalcique $((CaO)_3(Al_2O_3)$ noté C_3A et la ferrite ou aluminoferrite tétra-calcique $(4CaO\ Al_2O_3Fe_2O_3\ )$ noté C_4AF.

L'ajout du ciment au sol humide conduit à l'hydratation des différents composés (silicates et aluminates) et engendre la formation de composés cimentaires dont les principaux sont : des silicates de calcium hydratés noté CSH, des aluminates de calcium hydratés CAH et de la

portlandite noté CH. De façon générale, la prise hydraulique d'un ciment courant peut se décomposer en trois étapes (LCPC–SETRA, 2000) :

La première étape est celle du démarrage de la prise qui correspond au temps nécessaire à la mise en solution et à la précipitation sous forme de gel des silico-ferro aluminates de calcium dans l'eau libre du sol. Ce temps, qui correspond au délai de maniabilité, peut varier entre 2 et 24 h.
La deuxième étape correspond au développement de la cristallisation du gel et donc de la rigidification du mélange provoquant ainsi la prise hydraulique proprement dite. Elle s'étend, selon le type de ciment, de quelques jours à quelques semaines.
La troisième étape commence une fois la prise terminée, c'est-à-dire après formation de la quasi-totalité des silicates et d'aluminates hydratés. Elle correspond à la période dite de durcissement durant laquelle la croissance des résistances mécaniques se poursuit.
Cette étape peut durer, selon la nature du ciment, quelques semaines à plusieurs mois . (Mehenni, 2015).
le ciment courant est constitué de composants anhydres dont les principaux sont : l'alite ou silicate tricalcique ($3CaO.SiO_2$) noté C_3S, la bélite ou silicate bicalcique ($2CaO.SiO_2$)

II.3.3.2 Effet de ciment sur les caractéristiques géotechniques des sols argileux

Younoussa, (2008) montre dans son étude que la teneur en eau optimale croît tandis que la densité sèche maximale de l'argile décroît avec l'ajout du ciment. L'augmentation de la teneur en eau optimale est due à la forte affinité du ciment vis à -vis de l'eau. L'augmentation de la quantité de ciment requiert plus d'eau pour dissocier la portland ($Ca(OH)^2$) et pour produire des cations Ca^{2+} nécessaires aux réactions d'échange cationique. La réduction de la densité sèche maximale est due au fait que l'ajout du ciment crée l'agrégation des particules et de ce fait génère un plus grand volume. Cela entraîne une modification de la distribution de la taille des particules.

Ikhlef et al (2015) ils ont mené une étude sur un sol argileux, de Sidi Bel abbés de l'Algérie. Cette étude a révélé que le ciment est inefficace pour améliorer l'argile à court terme ; il augmente la teneur en eau optimale et diminue la densité sèche maximale. Il augmente aussi la résistance à la compression après le traitement.

Atuonye et al (2016) ont étudié l'effet de ciment la chaux sur la stabilisation des propriétés géotechniques d'un sol argileux. Cette étude a montré que la limite de liquidité, limite de plasticité, l'indice de plasticité et limite retrait sont réduite de 44%,32%, 12%, et 6.4% respectivement.

II.3.4 Traitement physique

Cette technique consiste à supprimer la couche du sol gonflant en excavant jusqu' à une certaine profondeur, puis remblayer avec des sables ou autres matériaux graveleux. La mise en place du remblai peut en effet amortir une partie du soulèvement ultérieur et aussi une amélioration de l'homogénéité des teneurs en eau. On distingue deux manières de procéder a une stabilisation physique :

- Modification des propriétés des sols pour une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Dans ce cas on intervient directement sur la granularité du sol, le

mélange obtenu conduit selon le cas, a la diminution de la plasticité du matériau de base par l'ajout de sable, ou a lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines.

- Ajout de fibres. Cela renforce la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer au moment du retrait de l'argile lors du séchage.

II.3.4.1 Sable

C'est vers les années soixante-dix que des chercheurs ont commencé à étudier l'effet de l'ajout de sable sur les propriétés géotechniques des sols argileux. Les résultats de ces travaux de recherche étaient positifs et très encourageants, pouvant l'efficacité de sable comme matériau d'amendement pours les sols argileux. Cette technique très intéressant dans les pays ou le sable est disponible car il est économique de valoriser un matériau local. Cependant, des cas pratiques de projets de traitement par ajout de sable dans la littérature sont plutôt rares. Nous citerons certaines d'entre eux. Dans cette partie nous allons citer les résultats obtenus par certains chercheurs portant sur la stabilisation des sol argileux par ajout de sable :

El Sayed et d'El Sohby (1981) ont tiré une constatation de son étude sur le traitement des sols argileux avec des sable et de limon à différentes concentrations, en vue de voir l'effet de la finesse sur le potentiel et la pression de gonflement d'un sol. Ils ont noté que la grosseur de la fraction non argileuse a une influence sur le gonflement. C'est-à-dire, que les particules fines provoquent un gonflement important. En plus, la pression de gonflement pour les mélanges argile- limon était plus importante que celle des mélange argile-sable. L'ajout de 20% de sable a permis de diminuer la pression de gonflement de 35%, en revanche 20% de limon diminue la pression de 7 % seulement.

Louafi et Bahar, (2012) ont étudié la stabilisation d'une bentonite à différents granulométrie et pourcentages sur la variation de la consistance et de la compressibilité de bentonite. Ils ont constaté une nette amélioration dans ces caractéristiques suite au traitement la plasticité est réduite considérablement, la sensibilité à l'eau ce sol à réduit .

Une étude expérimentale a été effectué par Prasad et Sharma (2014), ils ont examiné la variation de la densité sèche maximale et teneur en eau optimale d'une argile plasticité moyenne traitée avec du sable à différentes teneurs (0%,10%, 20%, 30% et 40%). Ils ont constaté que la teneur en eau optimale, jusqu'à 30% de sable, diminue, par la suite, il augmente légèrement. Cependant, la densité sèche maximale, jusqu'à 30% de sable, a augmenté et par la suite, il a diminué. En outre, dans cette étude, les auteurs ont montré l'amélioration de l'indice de CBR dans les sols argileux traité avec 30% de sable.

Goufi et al, (2022) ont étudié l'influence de sable de dune sur les caractéristiques d'un sol argileux de Sidi Hadjar de M'sila. Pour cela, ils ont utilisé des mélanges argile sable et à différents pourcentages (0% ; 10 % ; 20% et 30 %). Ils sont trouvé que la diminution de l'indice de plasticité et la teneur en eau , et augmentation de la densité sèche des différents mélanges est dû à le remplacement 'une partie faible densité de l'argile par des particules de sable de dune dans les mélanges. Ainsi, ils ont constaté que

l'ajout de sable à une argile augmente la résistance à la compression pour des pourcentages allant 10% et 20 %.

Eisa et al (2022) ont étudié le comportement d'une l'argile mélange avec le sable à différents teneurs, il a montre que le gonflement est réduite par l'ajout des pourcentages de sable. Plus le pourcentage de sable augmente, plus la diminution de gonflement. Le gonflement a diminué de 4,31 % de sa valeur initial à de 2,5 % lorsque le sol était mélangé avec 50% de sable.

II.3.4.2 Fibres

Plusieurs études ont montré que le traitement par les fibres est d'une efficacité. Cette méthode de traitement est intéressante car elle est adaptable à différents modes de mise en œuvre de la terre, à l'état liquide ou plastique et même par compression. Elles agissent sur les résistances mécaniques, les performances thermiques et encore d'autres aspects à savoir :

1-Augmentation importante de la résistance en traction, et souvent des résistances en flexion et compression,
2-Réduction de la fissuration et réduction des variations dimensionnelles dues au séchage des argiles grâce à l'effort distribué dans tous les sens par les fibres,
3-Accélération du séchage, par l'effet drainant des canaux de fibres.

II.3.4.2.1 Définition

Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériau qui a été introduite dans le commerce comme de nouvelles applications. Elles sont classées selon leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur forme (droite, on dulee, aiguille, …etc.), leur dimension (macro ou micro-fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour une application donnée, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et le mode de performance du composite .

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 microfibres) et leurs propriétés mécaniques (Mohammed, 2017).

II.3.4.2.2 Différents types de fibres

- **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. (Nassah, 2016)

- **Fibres animales**

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

- **Fibres végétales**

Les fibres végétales sont extraites des plantes, soit de la tige comme le lin et le chanvre (Figure II. 8) , 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. (Nassah, 2016)



Figure II. 8 : Fibre de chanvre.

- **Fibres métalliques**

Ce type de fibre, qui regroupe les fibres d'acier (Figure II.9**)** 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. (Nassah, 2016)



Figure II.9 : Fibres métalliques.

- **Fibres synthétiques**

Les fibres synthétiques sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenus à partir de substances ou de composes fournis par l'industrie pétrochimique. Elles ont fait leurs apparitions au début de 20ème siècle, après la réussite de la fibre de Viscose, depuis lors, un grand nombre de fibres synthétiques ont été mises au point; elles possèdent chacune des propriétés qui répondent à un type particulier d'application. Ces fibres, tout comme les fibres artificielles, sont obtenues par filage. Elles suscitent l'intérêt de beaucoup d'industriels pour leur faible coût, leur disponibilité et leur indépendance des saisons et surtout la possibilité de les adapter et modifier leurs propriétés, par contre, elles sont très critiquées quant à leur comportement vis-à-vis de l'environnement que ce soit pendant le processus de fabrication ou après leur utilisation et les difficultés de leur recyclage. Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées sont :

- Les polyamides (Nylons) ;

- Les polyesters ;
- Les dérivés polyvinyliques ;
- Les polyoléfines : les polyéthylènes et les polypropylènes : sont d'une importance croissante et leur production s'élève maintenant à environ 8% de toutes les fibres synthétiques (Quinn, 2002 cité par Taallah,2014).

Fibres de polypropylène

Le polypropylène est le plus récent des matières plastiques de masse. En quelques années, ce matériau a atteint un développement et une variété d'applications sans précédent. Il a été obtenu en 1954 par Giulio Natta. Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile. Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines des produits chimiques. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages 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, ainsi que l'élaboration de panneaux décoratifs et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux. Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60 mm), voir figure II.10 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, 2016).



Figure II.10 : Fibres de polypropylène.

II.3.4.2.3 Structure de polypropylène

Le polypropylène est une polyoléfine saturée formée de chaînes linéaires constituées des motifs propylène (CH2=CH-CH3) répétés par la polymérisation. Il existe trois conformations possibles pour le polypropylène, celles-ci étant déterminées par la position du groupement méthyle (CH3) disposé d'une

façon ordonnée ou pas le long de la chaîne principale du polymère. Avec une structure géométrique cristalline régulière. Natta emploie le terme « iso tactique » pour décrire ce polymère (PP). Les chaînes d'un polymère iso tactique peuvent se rapprocher les unes des autres pour former un solide ordonné. En 1957 le PP est commercialisé tandis que le polypropène syndiotactique (sPP) est industrialisé à partir de 1992, ainsi que le polypropylène atactique (PP). Les différentes configurations possibles sont présentées sur la figure II.11 (Rouag, 2014).

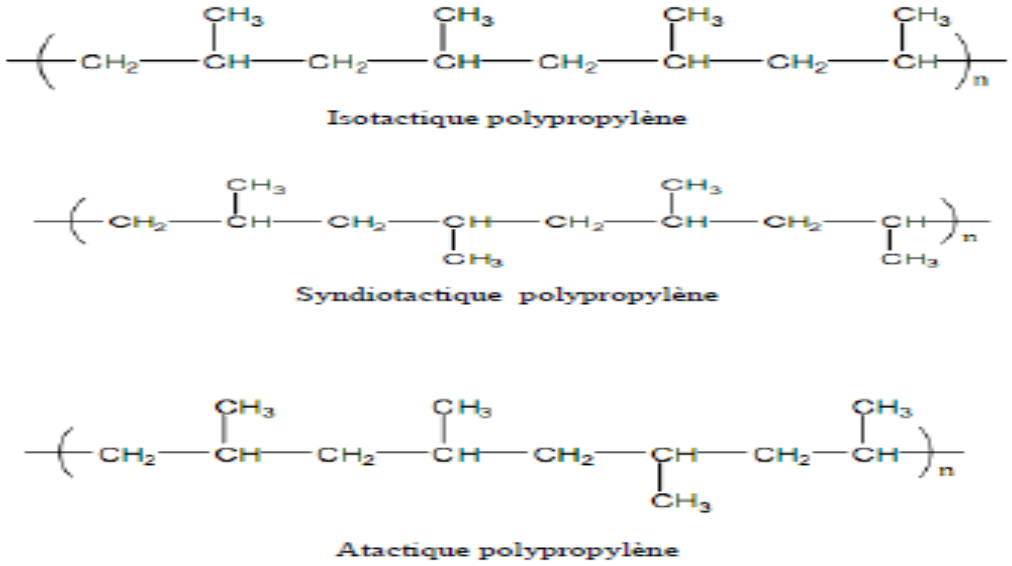


Figure II.11 : Structure de polypropylène (Tripathi cité par Rouag, 2014)

II.3.4.2.4 Effet des fibres de polypropylène sur le comportement des sols argileux

Plusieurs chercheurs ont montré que le traitement par les fibres est d'une efficacité. Cette méthode de traitement est intéressante car elle est adaptable à différents modes de mise en œuvre de la terre, à l'état liquide ou plastique et même par compression. Elles agissent sur les résistances mécaniques.

Hamza et al (2022) Ont effectué une étude expérimentale en vue de voir l'effet de l'ajout des fibres de polypropylène (0%-0,8%) sur le potentiel de gonflement d'une argiles expansives de Pakistan. Ils ont constaté que la diminution du gonflement et l'indice de compression est proportionnelle au pourcentage de l'ajout des fibres de polypropylène ,le meilleure réduction est obtenus pour au delà de cette valeur la réduction du gonflement et l'indice compression reste constante.

Hussein et Ali (2019) ont montré que l'ajout de 2% de fibres de polypropylène donne une augmentation double de la résistance à la compression axiale de sol expansive.

Daveet al (2019) ont étudié l'effet de fibres de polypropylène sur certaines propriétés géotechniques d'un sol expansive. Cinque pourcentages de fibres de polypropylène ont été utilisées (0,75% ; 1.5% ; 2% ; et 2.25%). Les résultats obtenus dans cette étude montrent que l'ajout de fibres de polypropylène (0% et 2.25 %) réduit la densité sèche maximale de l'ordre de 3 % à 6,5 % et augmente la teneur en eau optimale de l'ordre de 2,3 % à 5,25 % respectivement. La résistance à la compression uniaxiale augmente

de 119 % avec l'ajout de 1,5 % de fibres de polypropylène. Ils ont constaté aussi que l'ajout de 2,25% de fibres de polypropylène dans le sol permis d'augmenter la valeur de cohésion de 34,61% et l'angle de frottement a augmenté de 15,2°.

Ali et al (2020) ont mis en place un programme d'essais en laboratoire pour évaluer les propriétés d'un sol expansif traité par ajout de fibres de polypropylène. Les auteurs ont constaté, que l'ajout de 0,4 % de fibres de polypropylène produit une amélioration significative de la résistance à la compression uniaxiale (une augmentation de 279 %), du module d'élasticité (une augmentation de 113,6 %) et de l'indice de CBR immédiat et imbibé. Ces résultats confirment l'utilisation des fibres pour la construction de chaussée souple sur des sols expansifs.

Uday et al, (2023) Ont mélange un sol avec différents pourcentages de fibres de polypropylène (0.5% ;1% ;1.5% ; 2% ;2.5% et 3 %) et ils ont noté qu'un pourcentage de 2.5 %de fibres polypropylène est suffisant pour réduire de manière significative la plasticité et augmenter l'indice de CBR. Ils ont noté aussi l'effet de l'ajout de fibres de polypropylène sur la résistance à la compression simple La résistance de sol non traité est passée de 479.51kN/m² à 870.77kN/m² avec 2.5% de fibres polypropylène.

II.4 Conclusion

A travers cette recherche bibliographique, nous avons montré que plusieurs travaux confirment que l'emploi de chaux comme stabilisants des sols plastique. Les réactions d'hydrations de chaux présente l'avantage d'une évolution rapide ce qui permet d'améliorer les propriétés mécaniques des sols par l'ajout d'un composé chimique. Ce composé peut réagir avec les éléments du sol pour les modifier, mais aussi pour produire des nouveaux composés. Ces processus sont responsables de l'amélioration des performances mécaniques dans un délai court. Alors que de chercheurs ont explore l'effet des ajouts de fibres tels que polypropylène sur l'amélioration de comportement des argiles.

Ainsi donc il apparait nécessaire de mener un travail spécifique pour évaluer l'effet de l'ajout de fibres polypropylène sur les propriétés mécanique des sols argileux traités aux chaux. C'est cette thématique que nous traitons dans ce travail de mémoire.

Chapitre III

Matériaux et techniques expérimentale

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons de façon détaillée la démarche expérimentale ainsi que les moyens mis en œuvre pour caractériser le matériau étudié. Ensuite, nous présentons les matériaux (Argile , chaux et fibres polypropylène) sur lequel portera notre étudie. Nous allons aussi déterminer l'identification du sol argileux provenant de la région d'Ouezra dans la wilaya de Médéa à l'aide des différents paramètres Géotechnique. Le protocole expérimental développé dans le cadre de cette étude a été effectuée au sein de l'Entreprise populaire des travaux routiers centre (EPTRC) de Berrouaghia (Médéa), laboratoire mécaniques des sols de l'université de Blida et laboratoire national de l'habitat et de la construction de Djelfa (LNHC).

III.2 Matériaux utilisés

Les matériaux qui ont fait l'objet de notre étude sont l'argile très plastique, la chaux et de polypropylène.

III.2.1 Sol

III.2.1.1 Localisation et Géologie du site étudié

Le matériau argileux qui font l'objet de cette étude a été prélevée à Ouezra wilaya de Médéa au nord-de l'Algérie (Figures III.1 et 2) dont les coordonnées sont les suivantes : (latitude 36.256847 Nord et longitude 2.847226 Est),dans le cadre de réalisation d'un projet 1110 logements . Le matériau remanié a été excavé, rempli dans des sacs en plastique et transporté au laboratoire Cette zone présente une topographie complexe avec une grande variabilité de la formation lithologique. Cette région est fortement touchée par le risque de glissement de terrain en raison de ses conditions géomorphologiques, géologiques, climatiques et sismotectoniques.

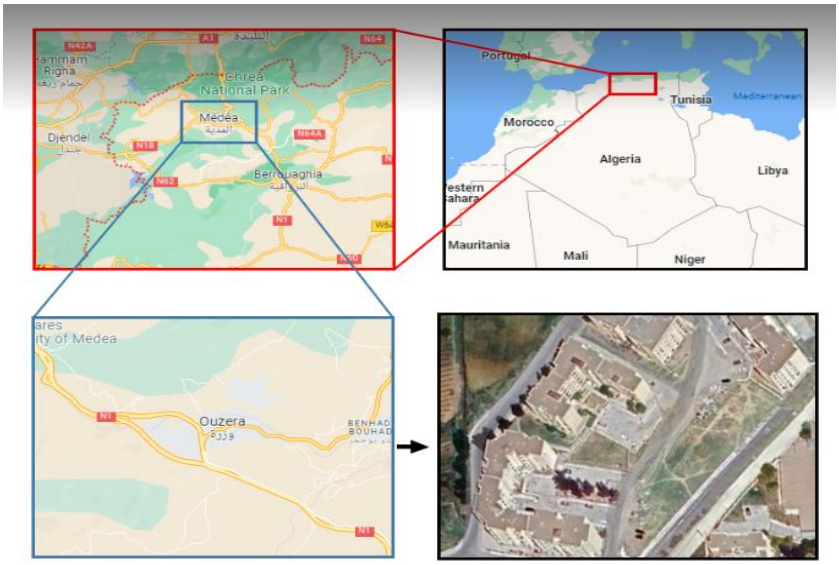


Figure III.1 : Localisation du site étudie (Google Maps).



Figure III.2 : Prélèvement de l'échantillon 28/2/2023.

III.2.2 Chaux vive

La chaux utilisée dans notre travail est une chaux vive (Figur**e** III.3) produit par la société BMSD-SARL situé dans la ville de Hessasna wilaya de Saida (Sud-Ouest de l'Algérie), leur propriété physico-chimique à été présenté dans le tableau au-dessous (Harrichane et al, 2011).

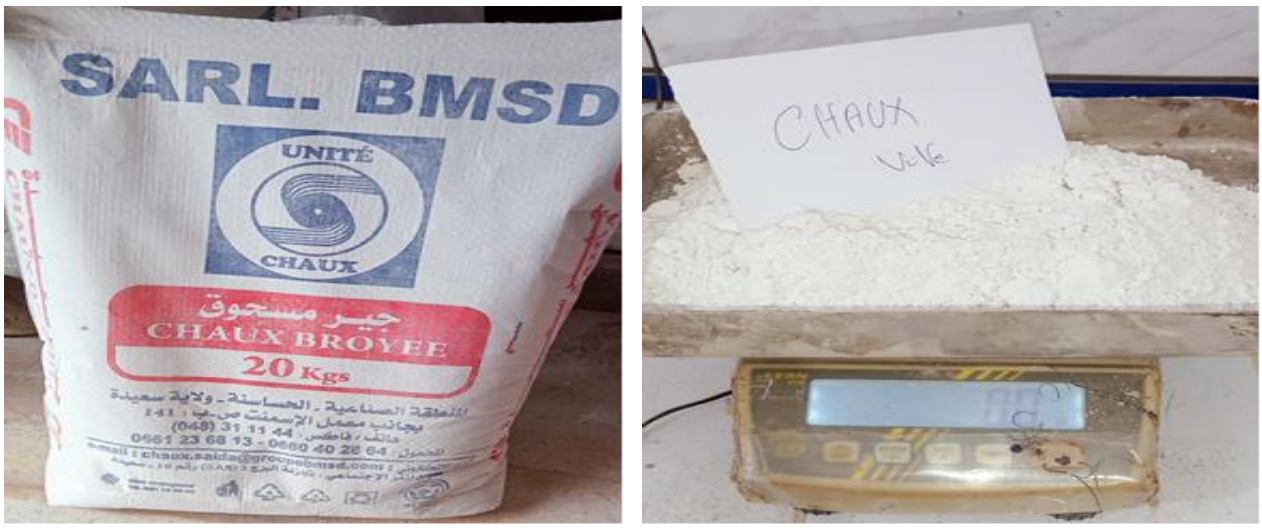


Figure III.3 : Chaux vive de wilaya de Saida.

Tableau III.1 : Propriétés chimiques des ajouts utilisés (d'après Harichane et al 2011).

Nom chimique	Chaux (%)
CAO	> 83.3
MgO	< 0.5
Fe_2O_3	< 2
Al_2O_3	< 1.5
Si O_2	< 2.5
SO_2	< 0.5
Na_2O	0.4 - 0.5
K_2O	…
CO_2	< 5
TiO_2	…
P_2O_3	…
$CaCO_3$	< 10

Tableau III.2 : Propriétés physique des ajouts utilisés.

Apparence physique	Poudre blanche
Densité spécifique	2
Plus de 90 µm (%)	< 10
Plus de 630 µm (%)	0
Matériau insoluble (%)	< 1
Densité apparente (g/l)	600 – 900

III.2.3 Fibres

Dans cette étude nous avons utilisé les fibres de polypropylène (PP). (Figure III.4) provient du SDC à Blida la société de la production est Turquie. Les caractéristiques techniques données par le fournisseur sont résumées dans le tableau au-dessous.

Tableau III.3 : Propriétés techniques de la fibre utilisée.

Propriété	**Valeur**
Type	Polypropylène (PP)
Longueur moyenne (mm)	12mm + / - 1 mm
Epaisseur	30-32 micro
Couleur	Transparent
Résistance à la traction (MPa)	467-548
Module d'élasticité (MPa)	4048-5674 MPa
Point de fusion	160 ° C
Point de combustion	150 ° C
Résistance aux acides et aux alcalis	Stable
Densité spécifique	0,91 g/cm
Pays d'origine	Fabriqué en Turquie



Figure III.4 : Les fibres de polypropylène

III.3 Méthodes expérimentales

Dans ce travail nous allons donner le programme d'essai suivi afin de faire une caractérisation physique, mécanique et chimique du sol testé, le protocole expérimental effectué avec le matériau argileux selon la norme Française (AFNOR). Les différents essais effectués dans ce travail est résumé dans le tableau au-dessous.

Tableau III.4 : Les différents essais effectués.

Essais		Norme
Essais chimiques	Analyse chimique sommaire	NF P 18 660-1
	Valeur du bleu de méthylène	NF P 94-068
Essais physiques	Teneur en eau	NF P 94-050
	L'analyse granulométriques par Sédimentométrie	NF P 94-057
	L'essai des limites d'Atterberg	NF P 94-051
Essais mécaniques	L'essai de Proctor normale	NF P 94-093
	L'essai de cisaillement la boite	NF P 94-071-1
	Résistance à la compression simple	NF P 98-846-41

III.4 Préparation d'échantillon

Après leur extraction, le sol a été placé dans des sacs en plastique, transportés au laboratoire Après séchage, les sols ont été ensuite concassés et broyés pour la préparation et exécution des essais géotechniques d'identification (ou de caractérisation) voir figure au dessous.



Figure III.5 : Préparation d'échantillon.

III.5 Caractéristiques géotechniques du sol étudié

III.5.1 Caractéristiques Chimiques

III.5.1.1 Analyse chimique [NF P 18 660-1]

L'analyse chimique a été réalisé selon la norme (NF P 18 660-1) au sein de laboratoire e national de l'habitat et de la construction. (LNHC) de Djelfa (Figure III.6). Les résultats sont résumés dans le tableau III.5

Tableau III.5 : Résultats de l'analyse chimique.

Constituants	Chlorure (Cl^-)	Carbonates ($CaCO_3$)	Sulfates (SO_4^-)
Valeurs	0,32 (%)	26.65 (%)	343(Mg/Kg)

D'après l'analyse chimique, on voit que notre matériau présente une prépondérance, un pourcentage de 26.65 carbonates, selon la norme NF P 94-048, comme indique le tableau (III.6) le matériau étudiée a été peu calcaire.

Tableau III.6 : Classification des sols en fonction du pourcentage

Pourcentage de $CaCO_3$	**Classification**
<10	Non calcaire
10 à 29	Peu calcaire
30 à 69	Moyennement calcaire
70 à 89	Fortement calcaire
≥90	Calcaire





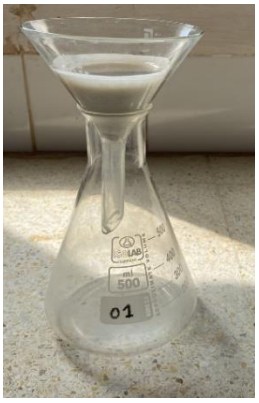






Figure III.6 : Analyse chimique

III.5.1.2 Essai du bleu de méthylène [NF P 94-068]

L'essai au bleu de méthylène est conduit selon la norme NF P 94-068. Il permet de mesurer la capacité d'adsorption ionique des sols à l'aide du bleu de méthylène. Le principe de l'essai consiste à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène jusqu'a ce que les particules argileuses en soient saturées. Il apparait alors un début d'excès qui marque la fin de l'essai et que l'on détecte par le test dit à la tâche.

En pratique, on détermine la valeur de bleu de méthylène à la tâche sur 60 g de matériau de, fraction 0/2 mm mis à tremper dans 500 ml d'eau et maintenus en permanence sous agitation. On procède à des additions de bleu de méthylène jusqu'à ce que toutes les particules du sol soient saturées. La saturation est déterminée par le test de la tâche, en observant la formation d'une auréole bleue sur le papier filtre où l'on dépose une goutte de solution (Figure III.7)



Figure.III.7 : Essai de bleu méthylène.

A partir de la valeur de bleu méthylène on peut de calculer la surface soufique par la formule suivante :

$$TSSA = \frac{VB}{100} \times \frac{N}{337} \times 130 \times 10^{-20}$$ TSSA= 21VB (m²/g)

Les résultats obtenus de notre matériau sont récapitulés dans le tableau III.6 :

Tableau III.7 : Résultat de la valeur du bleu de méthylène.

Échantillon	**Le volume Injecté (**ml**)**	**VB (ml/g)**	**SST (**m²**/g)**
Argile	280	4,66	97,86

D'après le résultat obtenu on ne distingue que notre argile peu active selon le tableau ci-dessous.

Tableau III.8 Qualificatif l'activité de la fraction argileuse selon le coefficient VBS.

Coefficient VBS	**Activité de la fraction argileuse**
0 <VBS< 3	Inactive
3 <VBS< 5	Peu active
5<VBS< 13	Moyenne
13 <VBS< 18	Active
18 <VBS	Très active

III.5.1.3 Mesure de pH

Cette mesure a été déterminée à l'aide d'un pH-mètre sur une suspension de 50 grammes de matériau sec dans 300 millilitres d'eau déminéralisée. La mesure du pH peut fournir de précieux renseignements sur la prédominance de matières organiques évolués ou carbonates**.** L'analyse de notre sol a montré que son pH est 8,2.

III.5.2 Caractéristiques physiques

III.5.2.1 la teneur en eau naturelle [NF P 94-050]

Au début de chaque essai dans laboratoire on doit prendre un échantillon et on commence déduire la teneur en eau. Pour évaluer la teneur en eau naturelle de l'argile étudié, nous avons prélevé une masse M1 que nous avons placée dans une étuve a 105°C pendant 24 heures. Au sortir de l'étuve et après refroidissement, nous notons une nouvelle masse M2. Le teneur en eau de l'échantillon étudié a été estimé selon la relation au dessous.

$$W = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100$$

Donc la teneur en eau contenue dans le sol testé est 20.87%.

III.5.2.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie [NF P 94-057]

Les analyses granulométriques par sédimentométrie est menée selon la norme NF P94-057. Le tamisage est pratique pour des grains de diamètre supérieur à 80 µm, et la sédimentométrie pour les grains les plus fins.

La sédimentmétrie consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente, Le principe de cet essai est fondé sur la loi de Stockes ou la vitesse de sédimentation des particules en suspension dans un milieu dépend de leurs diamètres.

On prend 80g d'échantillon, en mélange avec l'eau distillée additionnée d'un défloculant pour imbiber puis disperser l'échantillon. Ce mélange est constitué à partir de 440cm3 d'eau distillée et de 60cm3 d'une solution à 5% d'hexa métaphosphate de sodium ($Na^6(Po^3)_6$, $10H_2O$), introduit la prise d'essai dans le récipient utilisée avec l'agitateur mécanique afin d'agitation pendent 3min, laisser à imbibé au moins 15h à la température abiante. après la fin durée compléter par l'eau distillé jusqu'à 2000cm3 dans un éprouvette, verser 2000cm3 dans une second éprouvette et plongé le thermomètre et le densimètre parfaitement propre et commencer de lire les lectures. Les résultats de l'analyse sont traduits sous forme d'une courbe semi logarithmique, présentée sur la figure III.5. Ces résultats sont illustrés dans le tableau III.9.

Tableau III.9 : Résultats d'analyse granulométrique par sédimentométrie.

D(m)	Temps (M)	Température (°C)	Lecture Rt (g/cm³)	Profondeur effective-Ht	% P sur le 80µm	Facteur F
0,0643	0,5	23,5	1,0235	12,295	91,31	0,01297
0,0455	1	23,5	1,0235	12,295	91,31	0,01297
0,0322	2	23,5	1,0235	12,295	91,31	0,01297
0,0207	5	23,5	1,0235	12,675	90,93	0,01297
0,0146	10	23	1,0235	12,675	90,93	0,01297
0,0103	20	23	1,0235	12,675	90,93	0,01297
0,0074	40	23	1,0225	13,005	86,96	0,01297
0,0054	80	22,5	1,021	13,5	82,99	0,01312
0,0032	240	23	1,018	14,49	71,08	0,01297
0,0014	1440	21,5	1,0125	16,305	47,26	0,01328

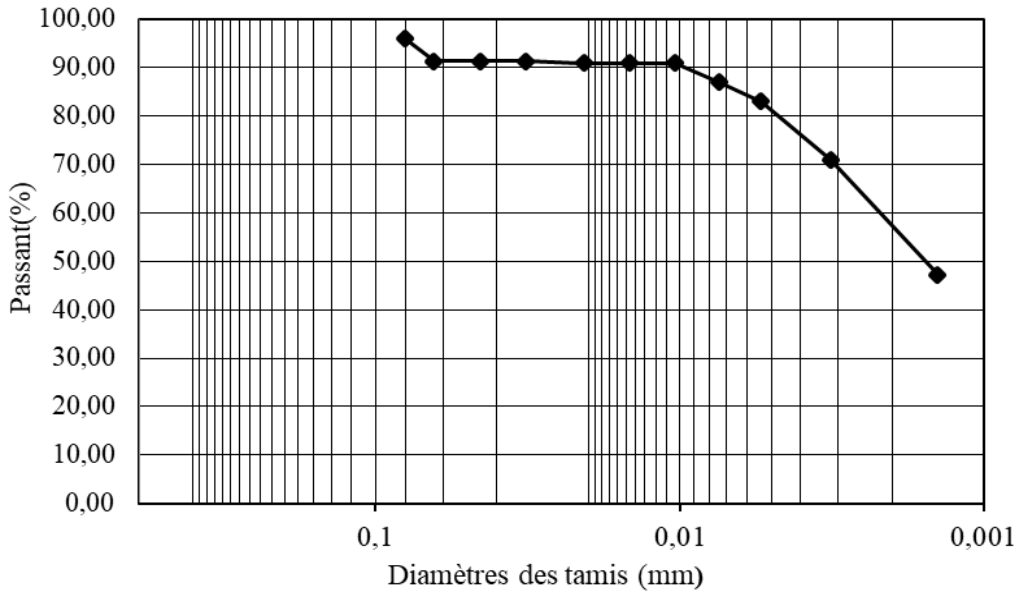


Figure III.8 : Courbe analyse granulométrique par sédimentométrie.

A partir des courbes granulométriques de sol, on constate que ce sol est très fins, car le pourcentage des éléments fins (<80µm) présentent plus de 91%.

III.5.2.3 Limites d'Atterberg [NF P 94-051]

La détermination des limites d'Atterberg est menée selon la norme NF P 94-051. Cet essai se pratique sur la fraction de sol dont les particules ont une dimension inférieure à 0,40mm. Si à un échantillon de sol préalablement desséché et pulvérisé, on fait croître la teneur en eau de façon homogène par malaxage, il passe progressivement de l'état solide, à l'état plastique puis à l'état liquide. Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre.

1-Limite de liquidité

La totalité du matériau est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide. Après en procédant à remplir une coupelle propre et sèche, avec une spatule, d'une masse de pâte d'environ 70g. Cette pâte est étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air, présente en fin d'opération un aspect symétrique par rapport à l'axe vertical de la coupelle. Ensuite, on partage la pâte en deux parties au moyen de l'outil à rainurer. On actionne la came de façon à soumettre la coupelle à une série de chocs à une cadence de 2 coups pas seconde. On note le nombre de chocs (NC) nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 13 mm Figure III.9. La limite de liquidité (Wl) est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales (N, W). Wl est obtenue pour une valeur de N égale à 25 coups exprimée en pourcentage (%) voir figure III.10

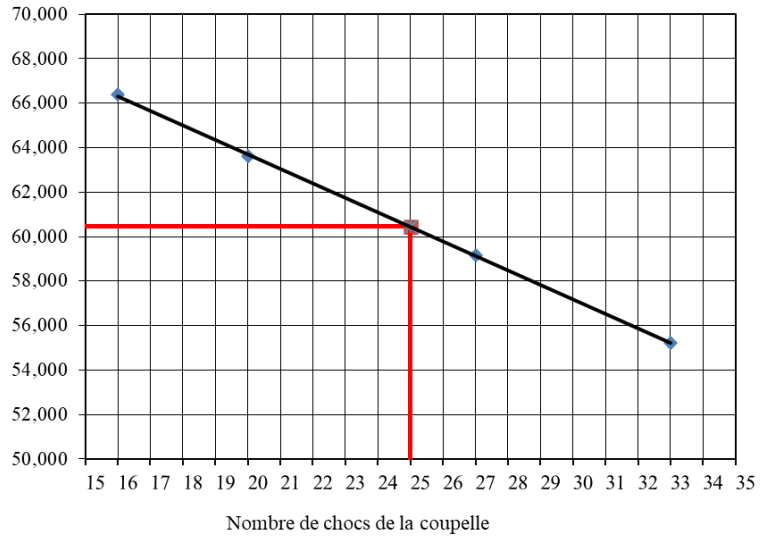


Figure III.9 : Limite de liquidité.

2-Limite de plasticité

La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm (voir figure III.11). Une fois les fissures apparues, on prélève la partie centrale du rouleau et la placer dans une capsule de masse connue, la peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve afin de déterminer sa teneur en eau.



Figure III.10 : Détermination de limite de plasticité

3-L'indice de plasticité

C'est la différence entre la limite de liquidité et limite de plasticité qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon.

4-L'indice de consistance

Il permet de caractériser la consistance d'un sol :

- **Ic** inférieur à une valeur de l'ordre de 0,7 : sols peu consistants avec lesquels on risque d'avoir des problèmes de traficabilité.

- **Ic** supérieur à une valeur de l'ordre de 1,3 : sols de consistance élevée avec lesquels on risque d'être confronté à des problèmes d'extraction.

Le tableau III.10 -ci-dessous résume les limites trouvées pour l'argile étudié.

Tableau III.10 : Résultat des limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg	Limite de liquidité	Limite de plasticité	Indice de plasticité	Indice de consistance
Résultants (%)	60,50	20,03	40,47	0,979

Pour déterminer l'état de l'argile, portant les résultats obtenus sur le diagramme de Casagrande en fonction de la limite de liquidité et l'indice de plasticité . D'après L'abaque de Casagrande (Figure III.10**)** l'argile étudiée est une argile très plastique. Selon la classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA-LCPC, 1992), (Tableau III.10) le matériau étudié est une argile très plastique. Ceci traduit une plus grande sensibilité à l'eau.

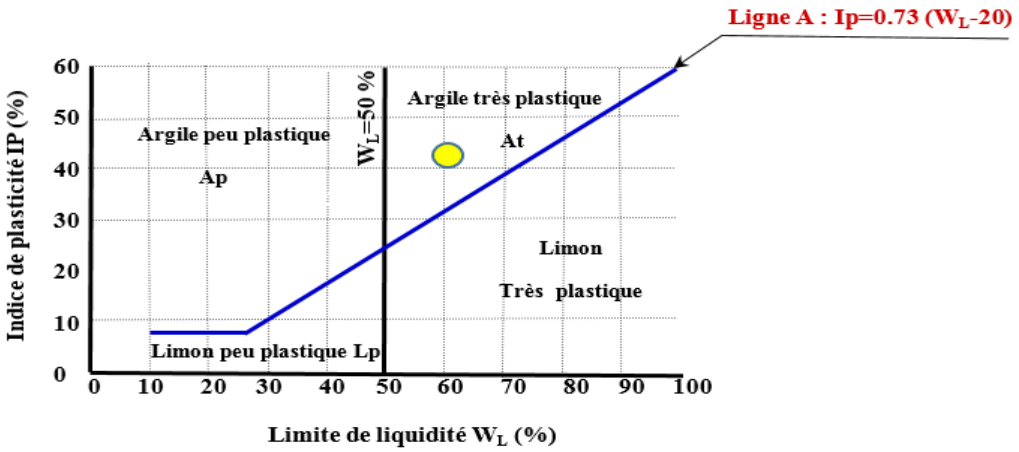


Figure III.11 : Classification des sols selon CASAGRANDE.

Tableau III.11: Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA-LCPC 1992).

Indice de plasticité	Caractéristique
$I_p \leq 12$	Faiblement argileux
$12 < I_p \leq 25$	Moyennement argileux
$25 < I_p \leq 40$	Argileux
$40 < I_p$	Très argileux

III.5.3 Caractéristiques mécaniques

III.5.3.1 Essai de Proctor normale (NF P 94-093)

L'essai Proctor a pour objectif la détermination de la teneur en eau optimale et de la densité sèche maximale pour un compactage normalisé d'intensité donnée. Le principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Après humidification, chaque part est conservée en boîtes ou sacs hermétiques durant un temps fonction de l'argilosité du matériau pour parfaire la diffusion de l'eau. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.



Figure III.12 : Réalisation de l'essai Proctor normale.

Le résultat obtenu de l'essai Proctor du matériau argileux est donné sur la figure III.14 D'après la courbe on remarque que l'argile étudié présente une densité séché maximale de 1,68 t/m³, et la teneur en eau optimale égale à 21,36%.

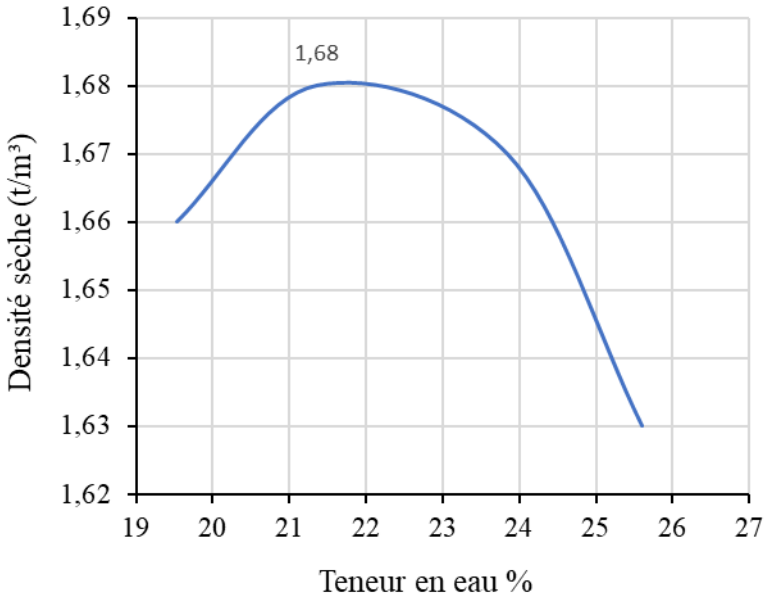


Figure III.13 : Courbe - Proctor normal.

III.5.3.2 Essai de cisaillement à la boite de Casagrande [NF P 94-071-1]

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boite de cisaillement constitue de deux demi-bottes indépendantes selon la norme NF P 94-071-1. L'objectif de cet essai c'est la détermination des paramètres de résistance au cisaillement qui sont l'angle de frottement interne φ et la cohésion C. L'essai comporte le cisaillement d'au moins trois éprouvettes de même dimensions, préparées dans les mêmes conditions, cisaillées à la même vitesse et soumises à des contrainte normale (100 kPa ; 200 kPa et 300 kPa). Le plan de séparation des deux demi-boites constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette.

L'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande a été réalisé sur notre argile à 95% l'optimum de Proctor . Pour cela on prenant une poudre sèche tamisée d'argile à 5 mm avec la teneur en eau optimale et en faisant un mélange de l'ensemble jusqu'à une homogénéisation complète (Figure III.15). Après humidification, le mélange est conservée sacs hermétiques durant un temps de 24 heures. Les échantillons de sol seront compactés statiquement et placés ensuite dans la boite de cisaillement de dimension 60x60 mm. L'essai adopté pour le cisaillement est un essai non consolidé non drainé UU.

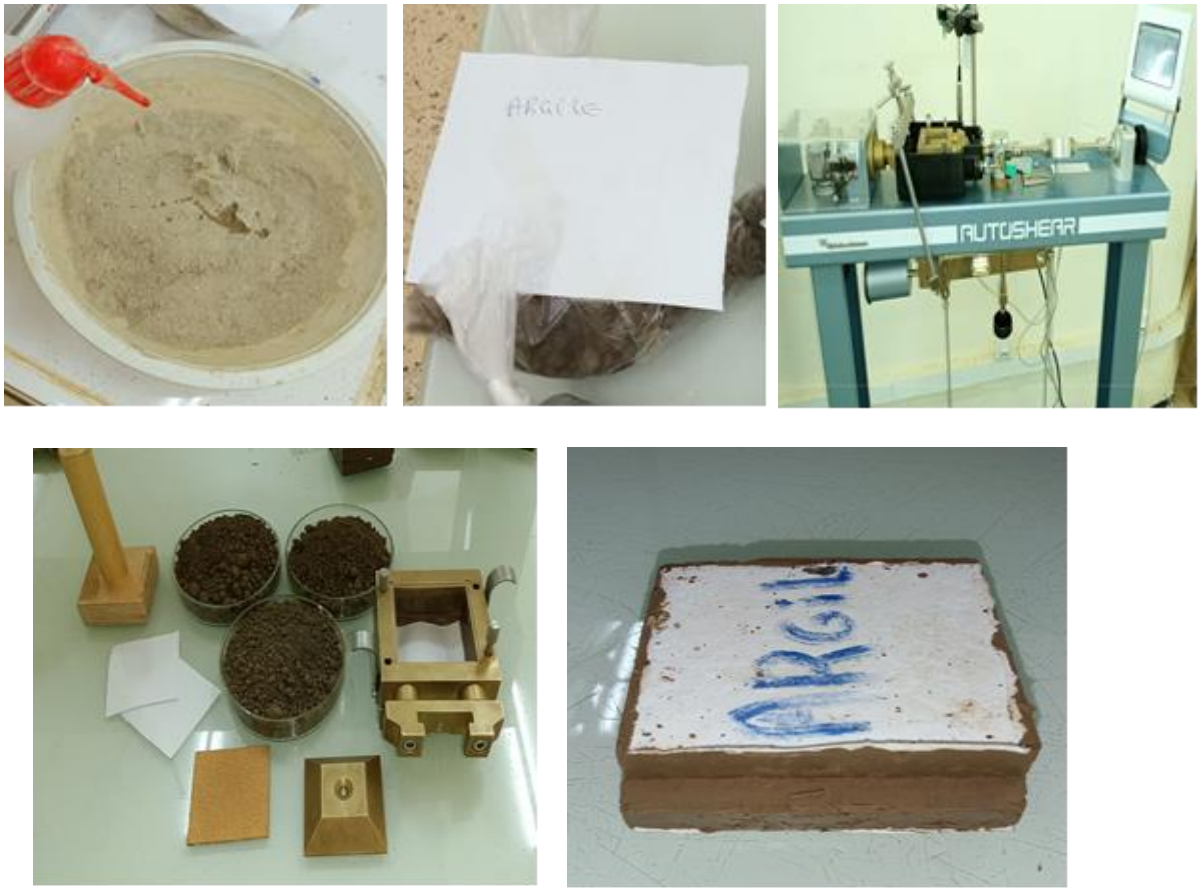


Figure III.14 : Essai de cisaillement rectiligne à la boite

Le résultat obtenu de l'essai de cisaillement rectiligne à la boite du matériau argileux est présenté sur les figures III.16-17 D'après ce résultat on noté que l'argile étudié présente une cohésion de 114,15kPa, et l'angle de frottement égale à 11%.

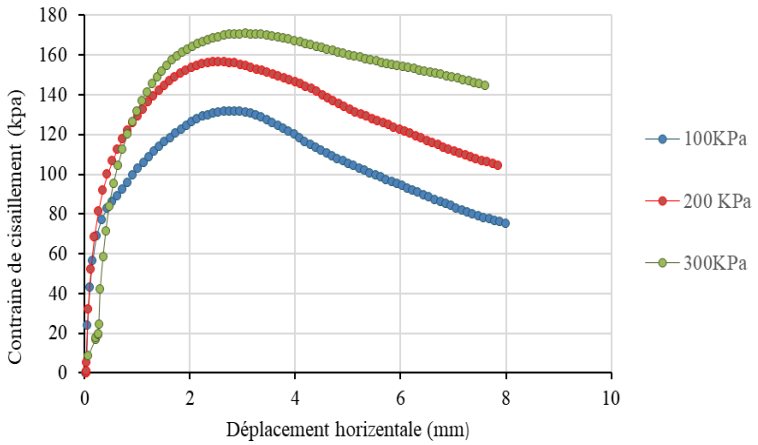


Figure III.15 : Contraintes de cisaillement en fonction de déplacement horizontal .

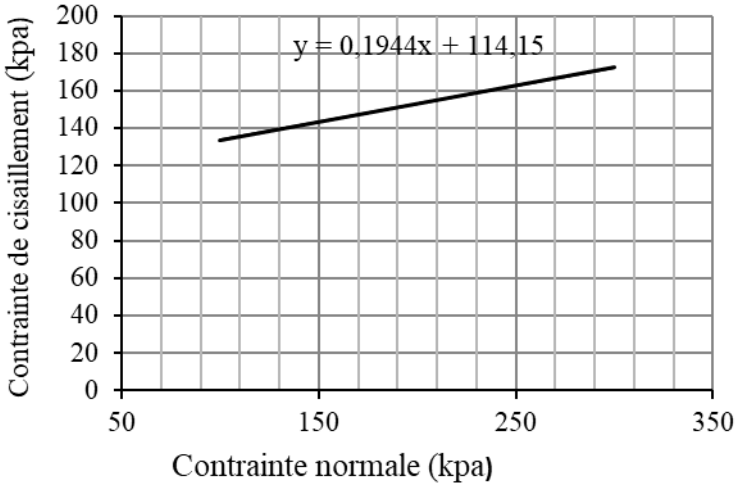


Figure III.16 : Courbe contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale.

III.5.3.3 Essai Résistance à la compression simple [NF P 98-846-41]

Cet essai qui a pour objectif de déterminer la résistance maximale en compression simple des sols est réalisé selon la norme NF P 98-846-41. Il consiste à soumettre l'éprouvette à une force axiale jusqu'à la rupture. La résistance à la compression simple Rc est définie comme la contrainte mesurée à la rupture.

Des éprouvettes de 50mm de diamètre et de100 mm de hauteur sont confectionnées selon la norme NF P 98- 230 -2. Leur compactage est obtenu statiquement à 95% l'OPN et conservées à une température de 20°C pendant des durées déterminées.

Les éprouvettes ainsi confectionnés ont été gardés pendant 7et 14 jours dans des sacs étanches et soumis par la suite à des essais d'écrasement à l'aide d'une presse Figure III.17 avec une vitesse d'écrasement constante. L'essai de compression simple est réalisé sur trois éprouvettes. La résistance à la compression simple de l'argile est la moyenne arithmétique des valeurs obtenues.



Figure III.17 : Essai Résistance à la compression simple.

L'évolution de la résistance à la compression de l'argile étudié est donnée sur (la figure III.18) D'après cette figure on remarque que l'argile étudié présente une résistance de 0,392Mpa à 7 jours .

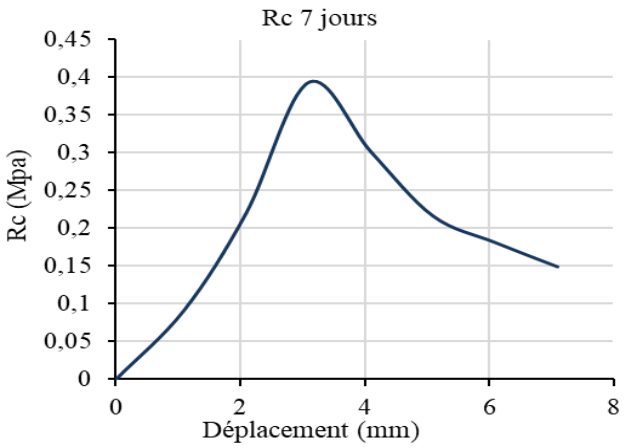


Figure III.18 : L'évolution de la résistance en compression à 7 jours.

III.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'identification des matériaux étudiés, afin de mieux présenter leurs aspects physiques et chimiques. A la lumière des résultats de caractérisation de matériau obtenus pour les différentes analyses réalisées, le sol étudié est un sol argileux de plasticité élevée. Son emploi comme un sol support poser des problèmes délicats au moment de la mise en oeuvre mais surtout à long terme pendant la vie de l'ouvrage. C'est la raison pour laquelle nous allons essayer d'améliorer leur caractéristique mécanique.

Dans le chapitre suivant on présente l'influence de l'ajout de fibres polypropylène à différentes proportions sur le comportement mécanique d'une argile traitée par la chaux ,on basent sur les paramètres de Proctor, résistance a cisaillement et la résistance à la compression simple.

Chapitre IV

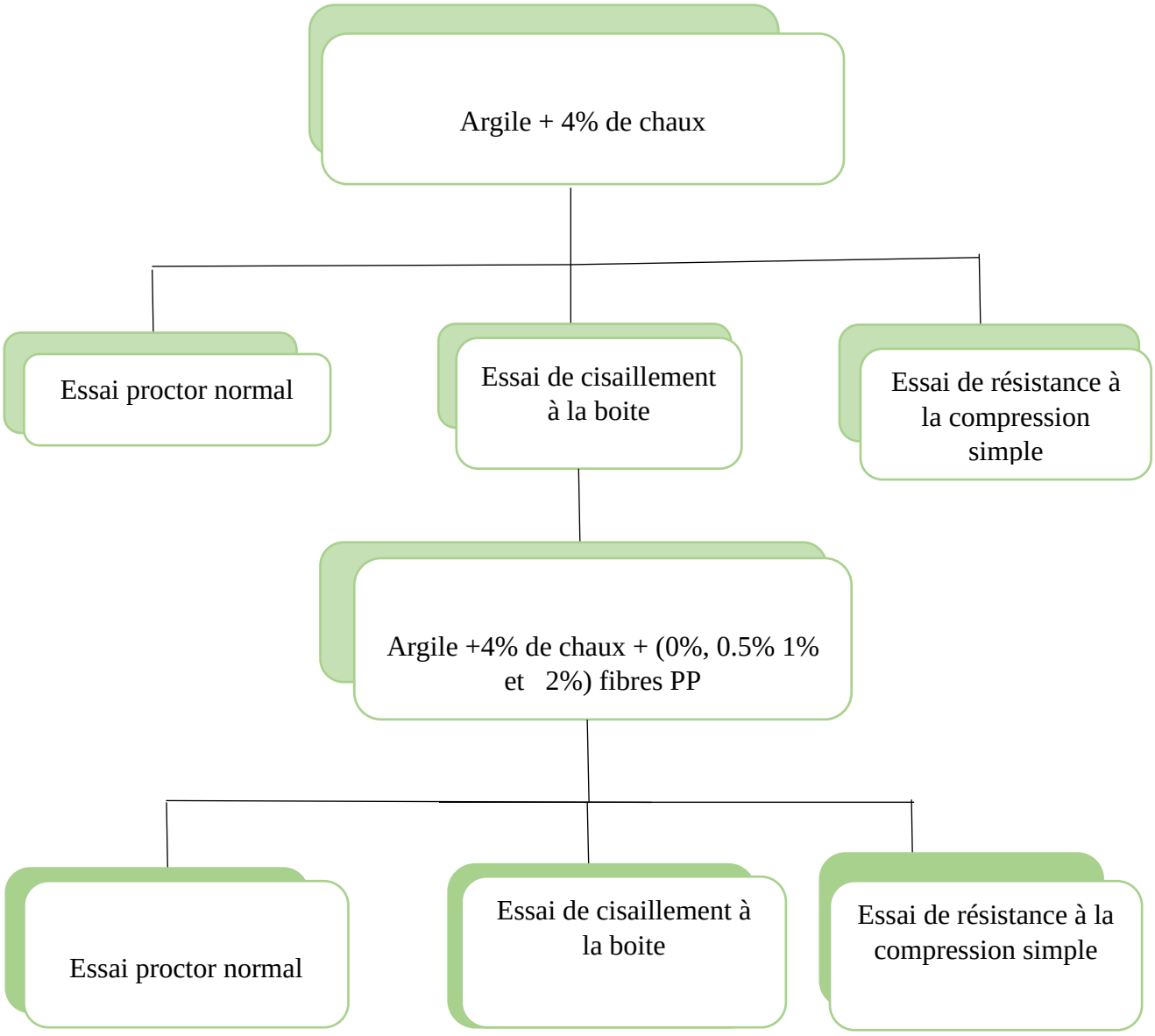
Effet des fibres polypropylène sur les caractéristiques mécaniques d'une argile traité par chaux

IV.1 Introduction

Les résultats obtenus dans le chapitre précédent montrent que l'argile étudié présente un indice de plasticité important (40,47%), son utilisation en technique routière, aéroportuaire ou ferroviaire en tant que sol support ou en tant que matériau de remblai est délicate voire impossible sans protections particulières.

Ce chapitre présent un programme expérimental qui a été effectué pour mieux comprendre l'influence de la chaux sur le traitement d'un sol argileux d'un cote et voire l'effet des fibres polypropylène (PP) avec différents pourcentages 0 % , 0.5%, 1%, et 2% sur la stabilité et le renforcement du sol d'un autre cote.

IV.2 Plan de travail



IV.3 Détermination du taux de demande en chaux par la méthode du Ph-mètre

Cette mesure a été déterminée à l'aide d'un pH-mètre sur une suspension de 50 grammes de matériau sec dans 300 millilitres d'eau déminéralisée, dans notre travail on prend 5 échantillons de 50 grammes et dans chaque échantillon on ajoute 0%, 2%, 4%, 6%, 8% et 10% de chaux. L'analyse de notre sol a montré que son pH est de 12. Les résultats obtenus sont représentées dans le tableau IV.1



Figure IV.1 : Mesure de PH à l'aide de pH-mètre

Tableau IV-1 : Résultat de la valeur du pH.

Argile + chaux (%)	0%	2%	4%	6%	8%	10%
pH	8,2	11,3	12	12,1	12,1	12,1

La courbe des pH en fonction des pourcentages de chaux est présentée sur la figure IV.2. On constante sur cette courbe que le pH de la solution augmente, donc l'alcalinité du milieu augmente avec le taux de chaux ajouté et cela jusqu'à une teneur de 4% à partir de laquelle il se stabilise à la valeur du pH de la solution de chaux. Ce taux est appelé la demande en chaux du sol. Le pourcentage de demande en chaux (est arrêté par le taux de chaux du mélange correspondant à un pH de 12.

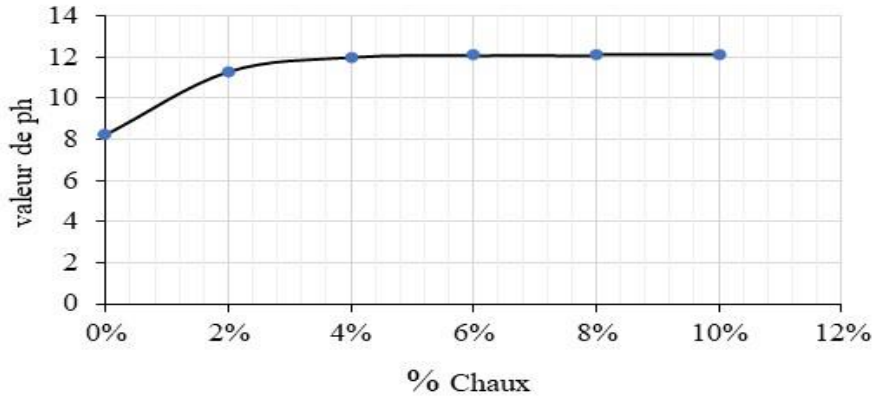


Figure IV.2 : Variation de pH en fonction de la chaux

IV.4 Préparation des mélanges

En premier lieu le matériau doit être séché à l'étuve à105ºC pendant 24 heures, ensuite broyé, et tamisé.

La deuxième étape consiste à ajouter des quantités de la chaux (4%), les fibres de polypropylène (PP) au sol selon le pourcentage voulu, le mélange est ensuite mis dans un bac pour effectuer le malaxage manuellement. Ensuite on ajoute la quantité d'eau nécessaire au mélange graduellement (Figure IV.3) . Le mélange obtenu est conservé dans des sacs en plastique hermétiques et bien fermé pour permettre une bonne diffusion de l'eau dans tout le matériau.



Figure IV.3 : Préparation des mélanges.

IV.5 Résulta et discussion

IV.5.1 Effet de l'ajout de chaux sur les caractéristiques mécaniques du sol étudié

Pour voir l'effet de l'ajout de 4 % chaux sur les propriétés mécaniques de l'argile de Ouezra, nous avons effectué une série des essais mécaniques tel que Proctor normale , cisaillement à la boite et résistance à la compression simple .

IV.5.1.1 Effet de l'ajout de chaux sur les caractéristiques de compactage

Les résultats de l'essai Proctor normale en fonction de l'ajout de 4% chaux sont inscrits aux (figures IV.4) . A la lumière des résultats des courbes Proctor normale, on observe que l'ajout de chaux produit une diminution la densité sèche et une augmentation de la teneur en eau optimale .On passe d'une densité sèche et une teneur en eau optimale de 1,68 kN/m³ et 21,36 % avec 0 % de chaux à 1,54 kN/m³ et 24,5% avec 4% de chaux respectivement (Figure IV.4) , Ceci peut se justifier par la dissociation des $Ca(OH)_2$ de la chaux . La diminution de la densité sèche d'un sol par l'ajout de la chaux provoque l'agglomération des particules du sol qui occupent alors de grands volumes. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Afès et Didier (2000), pour une argile gonflante traitée par la chaux à différents teneur variant de 0 % à 6% ; par Ghobadi (2014) ; sur une sol argileux de Iran , ceux trouvés par Garzón et al (2016) pour des dosages de 0% , 3% , 5 % et 7 % sur un sol argileux de l''Espagne.

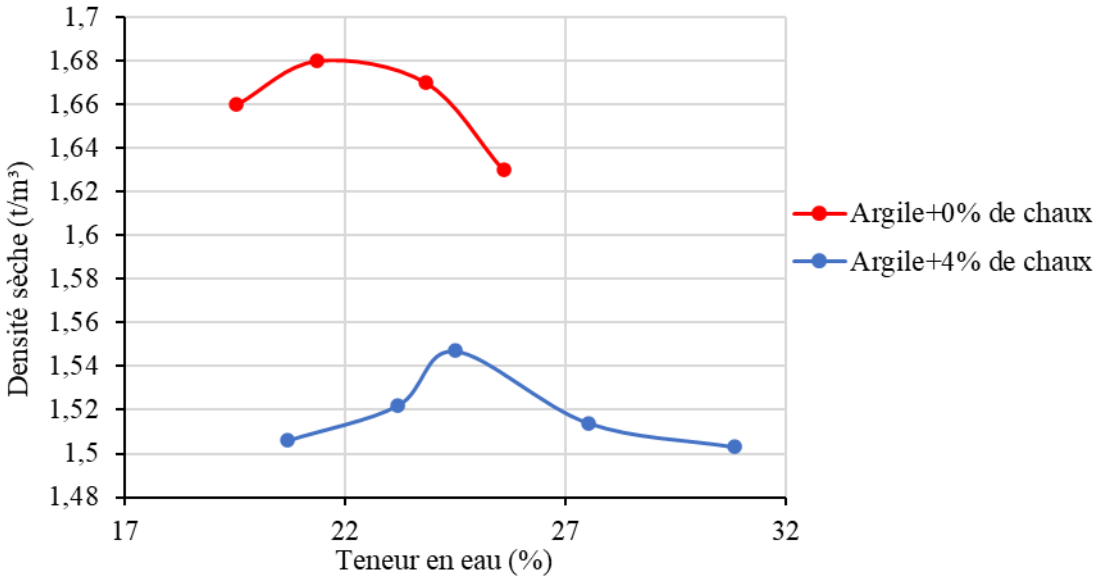


Figure IV.4 : L'influence de la chaux sur les paramètres de Proctor normale.

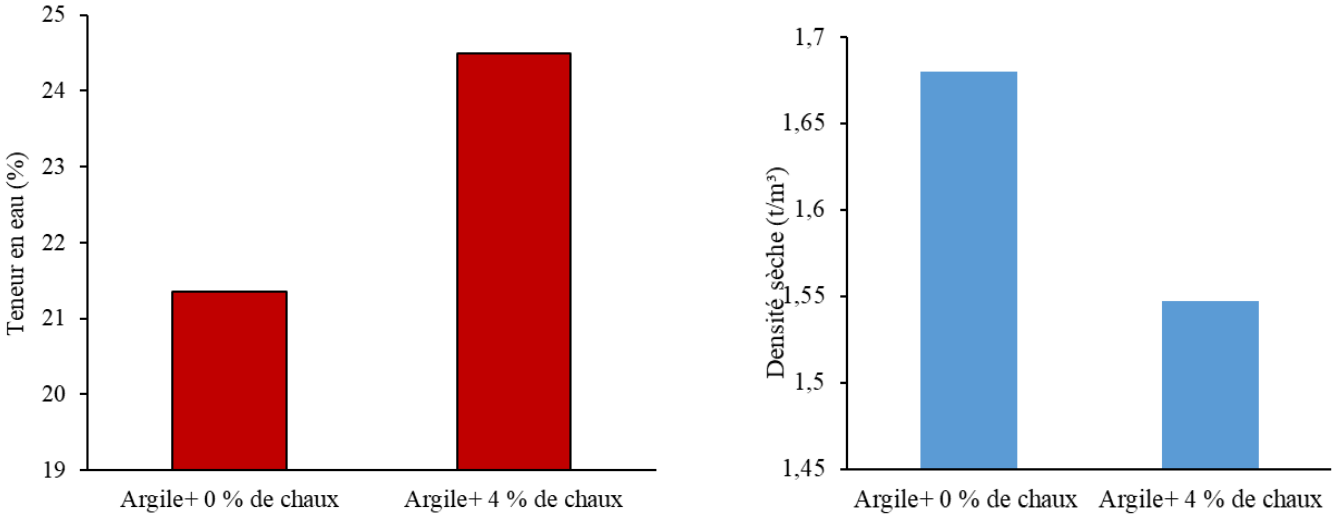


Figure IV.5 : Variations des paramètres de Proctor pour les mélanges(argile +chaux) densité sèche à gauche ; teneur en eau à droite .

IV.5.1.2 Effet de l'ajout de chaux vive sur la résistance au cisaillement à la boite

En faisant varier les contraintes de compression de 100kPa , 200kPa et 300kPa pour les deux mélanges (argile +4% de chaux). Nous obtenons les courbes contraintes- déformation représentées sur les figures ci –dessous. Les courbes contraintes-Déformations, représentées sur les figures (Figure IV.6) montrent que la contrainte de cisaillement augmente en fonction de la contrainte normale appliquée pour les deux mélanges (argile +4% de chaux).

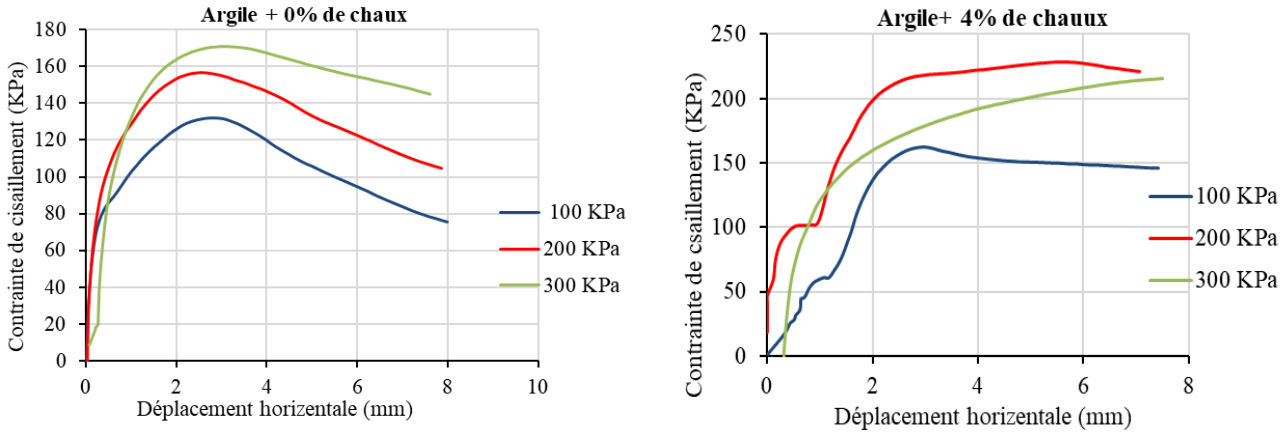


Figure IV.6 : Variation de contrainte de cisaillement en fonction de déplacement**.**

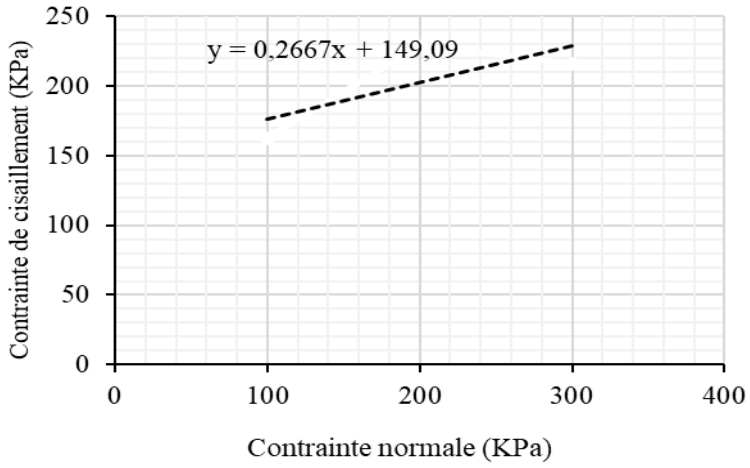


Figure IV.7: Contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale

La figure ci-dessous et le tableau IV.2 montrent l'évolution de la cohésion et l'angle de frottement pour les deux mélanges (argile +4% de chaux).

L'ajout de la chaux au matériau argileux a amené une augmentation de la cohésion et l'angle de frottement comme la montre (Figure IV.8). D'après les résultats obtenus on remarque une augmentation de la cohésion de l'argile non traitée est 114,15 kPa à environ 146,09 kPa après l'ajout de 4% chaux. Pour un ajout de 4% de chaux au sol argileux l'augmentation de l'angle de frottement est d'environ 36%. Ceci peut se justifier par l'augmentation du frottement entre les particules suite l'agglomération des particules argileuses et aux échanges cationiques entre le sol et la chaux (effet immédiat). Ces observations sont en bon accord avec les résultats rapportés par différents chercheur (Gay et Schad. 2000; Harichane et al . 2011).

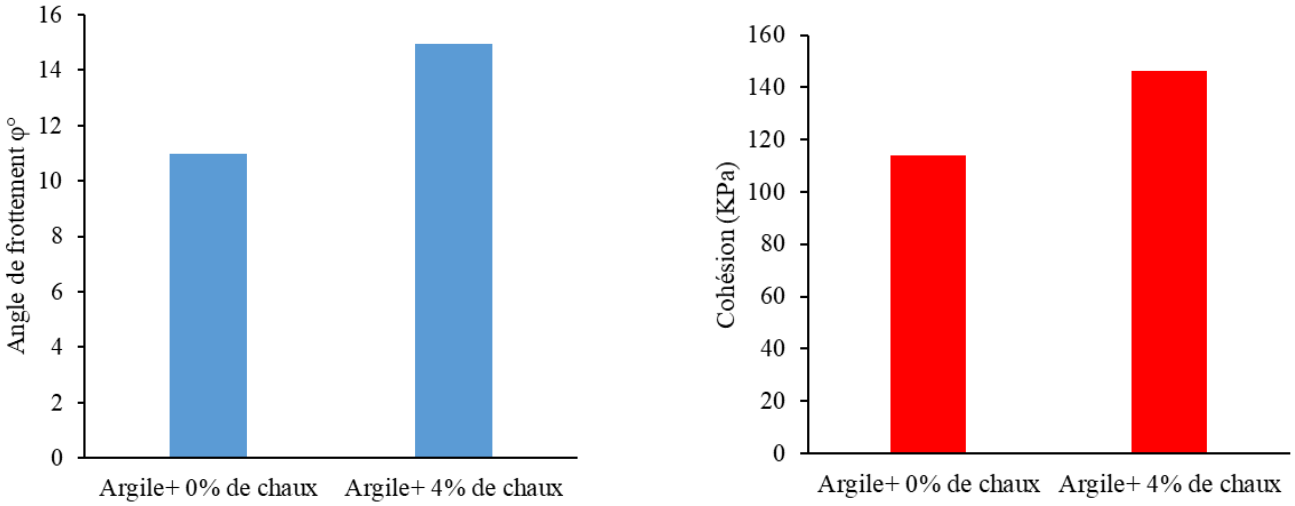


Figure IV.8 : Effet de la chaux sur l'angle de frottement et la cohésion

Tableau IV.2 : L'angle de frottement et la cohésion après et avant de l'ajout de chaux.

	Cohésion (KPA)	Angle de frottement (°)
Argile	114,15	11
Argile + 4% Chaux	149,09	14,96

IV.5.1.3 Effet de l'ajout de chaux sur la résistance à la compression simple

La résistances à la compression simple de l'argile non traitée et traitée par 4% de chaux à 7 et 14 jours ont représentés sur les figures IV.9 et IV.10.

La résistance à la compression simple de l'argile non traitée est passée de 0,39MPa et avec 4 % de chaux continue d'augmenter jusqu'à atteindre 0,66MPa au bout de 14 jours de cure. Cette augmentation peut se justifier par la réaction pouzzolanique entre la silice et l'alumine du matériau argileux avec le calcium de chaux. L'addition de chaux améliorer considérablement la résistance à la compression simple. Ce résultat est conforme à ceux trouvés par Ghobadi 2014, qui ont montré une amélioration de la résistance mécanique avec l'augmentation du dosage en chaux ajouté. Cabalar et al (2014), a constaté que l'ajout de 6% de chaux a permis d'augmenter la résistance à la compression simple de l'argile de 1843.15 Kn/m². La même tendance ont été observées par (Ali et Mohamed 2018).

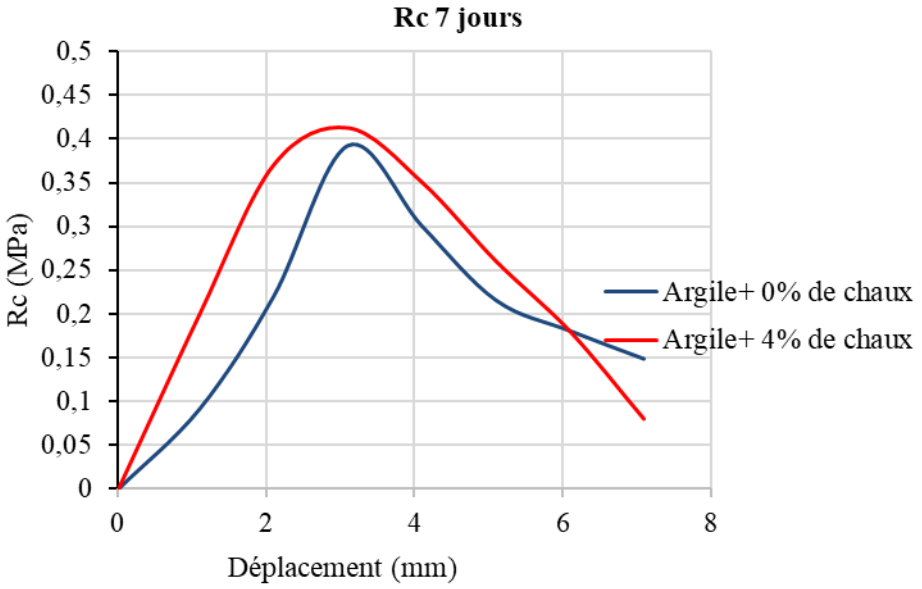


Figure IV.9 : Evolution de la résistance en compression simple à 7 jours

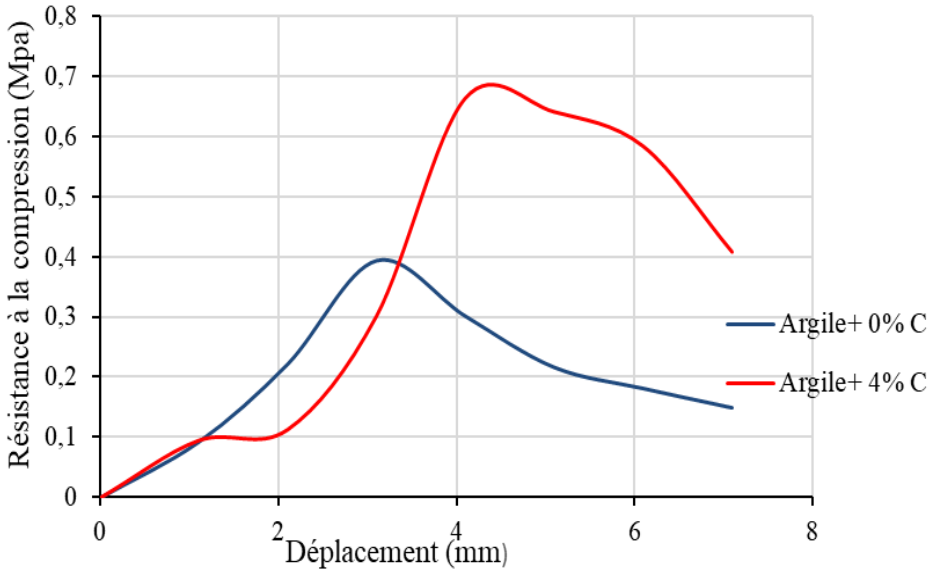


Figure IV.10 : Evolution de la résistance en compression simple à 14jours

IV.5.2 Effet de l'ajout de fibres de polypropylène sur les caractéristiques mécaniques d'une argile traitée

L'objectif de cette partie est évalué l'effet de fibres de polypropylène (0 % , 0.5% , 1% et 2%) sur les caractéristiques mécaniques d'une argile traitée par 4 % de chaux. A cet effet on effectuée une série des essais mécanique (Proctor normale, la résistance au cisaillement à la boite et la résistance en compression simple) sur le sol traité .

IV.5.2.1 Effet de l'ajout de fibres de polypropylène sur les sur les caractéristiques de compactage d'une argile traitée

L'ajout de fibres de polypropylène au matériau argileux traitée par 4% de chaux a amené une modification des paramètres de Proctor comme le montre la figure IV.11 . A partir des courbes Proctor, nous pouvons dresser le tableau suivant qui résume les caractéristiques Proctor du matériau après ajout de chaux et fibres de polypropylène

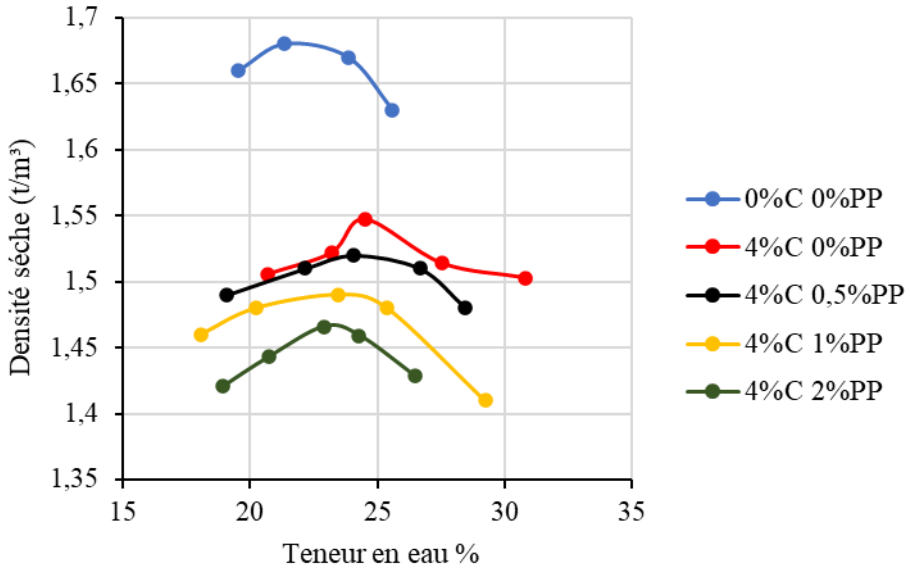


Figure IV.11 : Effet de la chaux et les fibres polypropylène sur les paramètres de Proctor normale

L'évolution de la densité sèche optimale et la teneur en eau optimale des mélanges (argile, chaux et fibres de polypropylène) sont présentées sur les figures IV.11 et IV.11. D'après les résultats obtenus ont constaté que l'ajout de fibre de polypropylène diminué la densité sèche de l'argile traitée par 4% de chaux. Ainsi ont constaté une légère diminution de la ta teneur en après l'ajout de fibres de polypropylène au matériau argileux traitée par la chaux. La densité sèche maximale de l'argile seule est de 1,68 t/m³, on constatée qu'un pourcentage de 4 % de chaux réduit la densité sèche de 1,54 t/m³, et 1,46 t/m³, pour l'ajout de 2 % fibres polypropylène. Ainsi on remarque que la teneur en eau de l'argile

traitée a diminué de 24,5 % à 22,9 % avec l'ajout de fibres de 2 %. Cette réduction en raison de la nature non absorbante des fibres de polypropylène.

Ces résultats sont bon accord avec ceux trouvés par Hamza et al (2022) pour des mélanges argiles – fibres de polypropylène , ils ont noté une diminution de la densité sèche maximale avec l'augmentation du fibres de polypropylène. Cette réduction pourrait être attribuée à la faible densité fibres de polypropylène, et l'interaction physique des particules du sol qui pourrait conduire à différents arrangements microstructuraux. Ceux trouvés par Ali et al 2020.

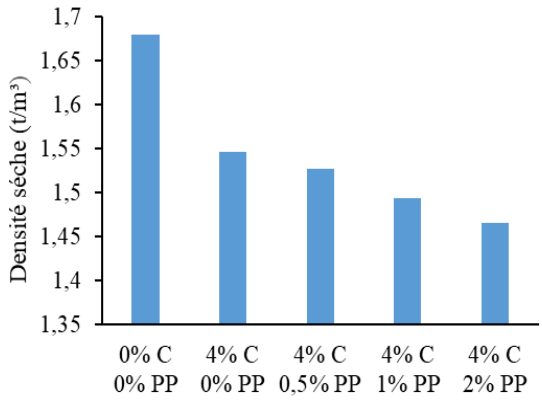


Figure IV.12 : L'influence de la chaux et les fibre PP sur la densité sèche

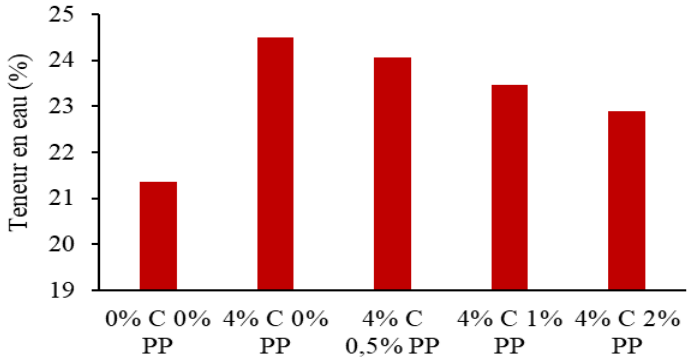


Figure IV.13 : L'influence de la chaux et fibre PP sur la teneur en eau

Tableau IV.3 : Les résultats de compactage obtenus à partir de l'essai Proctor normal.

Échantillon	Argile	Argile +4% C	Argile+4%C +0,5 PP	Argile +4% C+1%PP	Argile +4% C+2% PP
Teneur en eau optimale %	21,36	24,5	24,07	23,47	22,90
Densité sèche (t/m³)	1,68	1,547	1,52	1,49	1,46

IV.5.2.2 Effet de l'ajout de fibres de polypropylène sur la résistance au cisaillement d'une argile traitée

Afin de voir l'influence de l'ajout de fibres de polypropylène sur les paramètres de cisaillement une séries des essais de cisaillement non consolidé non drainé a été réalisés sur des mélanges à chaque fois on change le pourcentage de fibres (0 ; 0,5 ; 1 ; 2%). Les courbes représentant les variations la contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontale et les courbe de contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale sont représentées sur les figures IV.14 et IV.15 L'évolution de la cohésion et l'angle de fortement pour les mélanges (argile –chaux –fibres de polypropylène) sont présenté sur les figures IV.16 et IV.17.

D'après les résultats obtenus, on remarque une augmentation de l'angle de frottement avec l' augmentation de la quantité des fibres de polypropylène ajoutée au matériaux argileux traitée par 4 % de chaux. Le taux d'augmentation de l'angle de frottement est de 35.72 % et double de sa valeur initiale pour des dosages variant de 4% de chaux et 2 % fibres polypropylène respectivement.

Ce résultat est conforme à ceux trouvés par Ben Younes et Bouzidi (2021) qui ont montré. Il a été 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 tire 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.

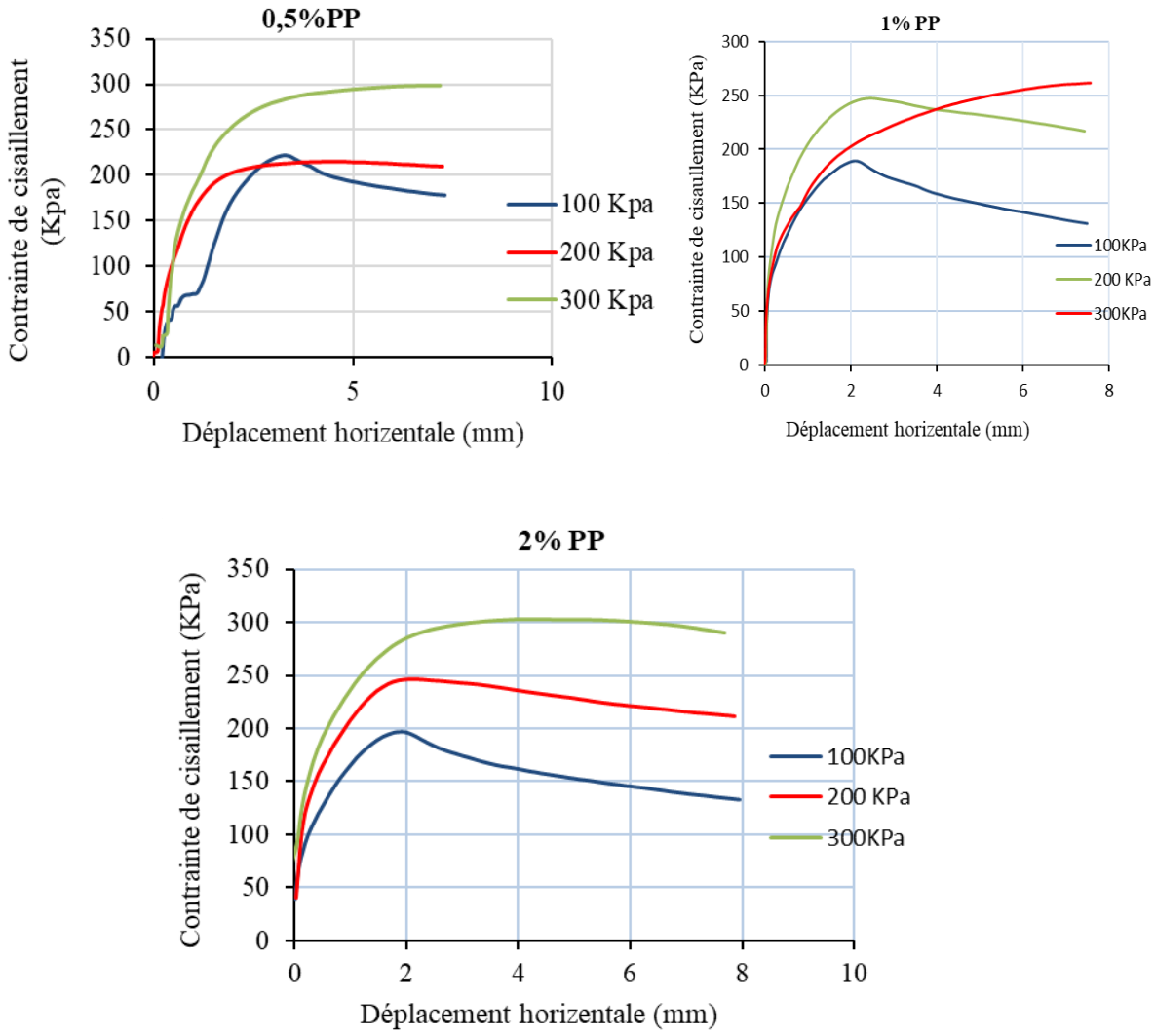


Figure IV.14 : L'influence de la chaux et les fibres sur la contrainte de cisaillement

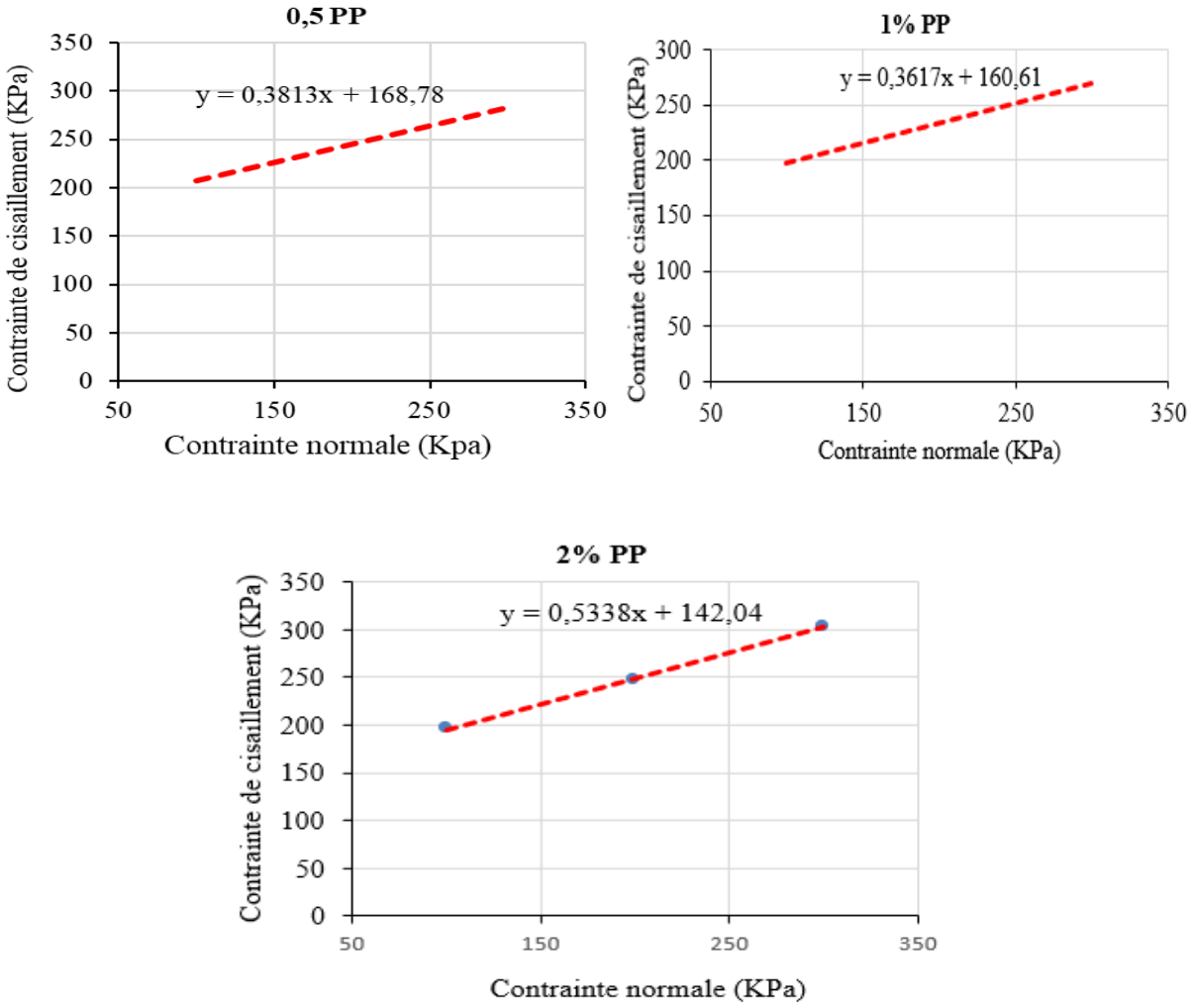


Figure IV.15 : Contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale

Tableau IV.4 : Les caractéristiques de cisaillement obtenus

Échantillon	Argile	Argile +4% C	Argile+4%C +0,5 PP	Argile +4% C+1%PP	Argile +4% C+2% PP
Angle de frottement(°)	11	14,93	20,87	19,9	28,1
Cohésion (kPa)	114,15	149,09	168,78	160,61	142,04

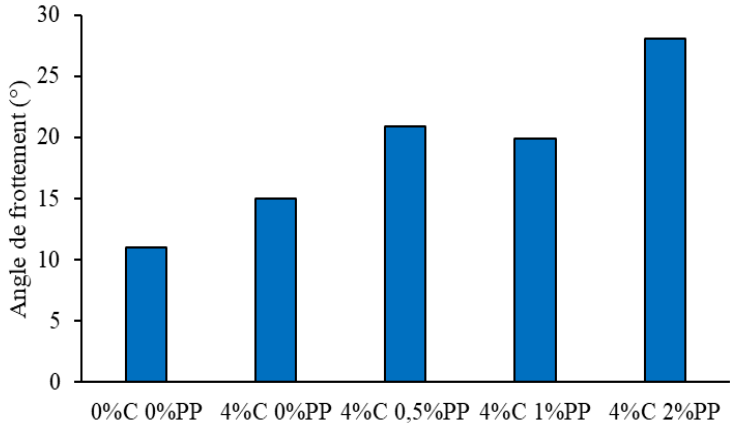


Figure IV.16 : Effet de l'ajout de chaux et les fibres PP sur l'angle de frottement interne de l'argile .

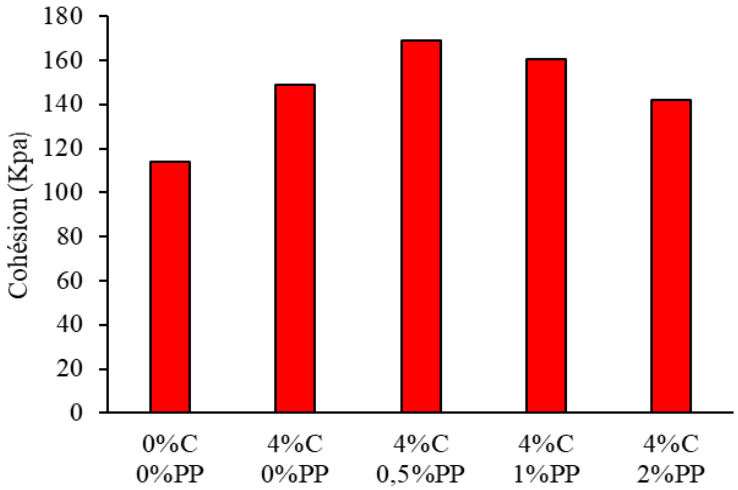


Figure IV.17 : Effet de l'ajout de chaux et les fibres PP sur la cohésion de l'argile

IV.5.2.3 Effet de l'ajout de fibres polypropylène sur la résistance en compression simple d'une argile traitée

Les résultats obtenus des essais de compression simple sur l'argile pour les différents mélanges sont donnés sur les figures IV.18 et IV.19 et le tableau IV.5 Selon les résultats obtenus que l'ajout de 4% chaux à l'argile seul permet d'améliore la résistance à la compression simple, l'argile traitée par 4% de chaux la résistance à la compression simple augmente de 0,39 à 0,42 MPa (7jours) et augmente de 0,66MPa (14jours) . Par ailleurs, si l'argile est traitée par la chaux puis l'ensemble est renforcé par des fibres de polypropylène, des améliorations importantes peuvent être réalisées. La résistance à la compression simple varie de 0,39 à 0,619MPa (7jours) et varie de 0,55 à 0,84 (14jours).

Ces améliorations résultent principalement des réactions pouzzolaniques entre la chaux et les minéraux argileux. L'effet de pontage de fibres de polypropylène qui peut empêcher efficacement le développement ultérieur des ruptures et des déformations du sol. Une autre raison d'augmenter la résistance à la compression simple est que le pourcentage de fibres de polypropylène augmente les particules de sol qui deviennent étroitement liées, et en raison de la forte connexion entre les particules de sol, l'attraction entre les particules augmente. La rupture par cisaillement s'est produite longtemps après l'apparition de la fissure.

Ce résultat est confirmé à ceux trouvés par Hussein et Ali (2019) ont montré que l'ajout de 2% de fibres de polypropylène donne une augmentation double de la résistance à la compression axiale de sol expansive. Uday et al, (2023). Ils ont constaté que de l'ajout de fibres de polypropylène améliore la résistance à la compression simple. La résistance de sol non traité est passée de 479.51kN/m² à 870.77kN/m² avec 2.5% de fibres de polypropylène

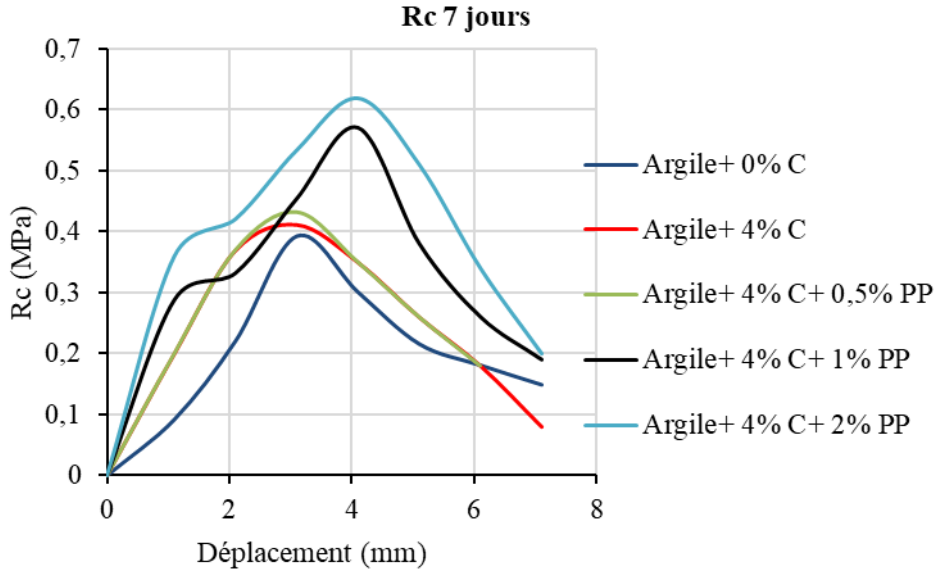


Figure IV.18 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes traitées par 4% chaux à 7jours.

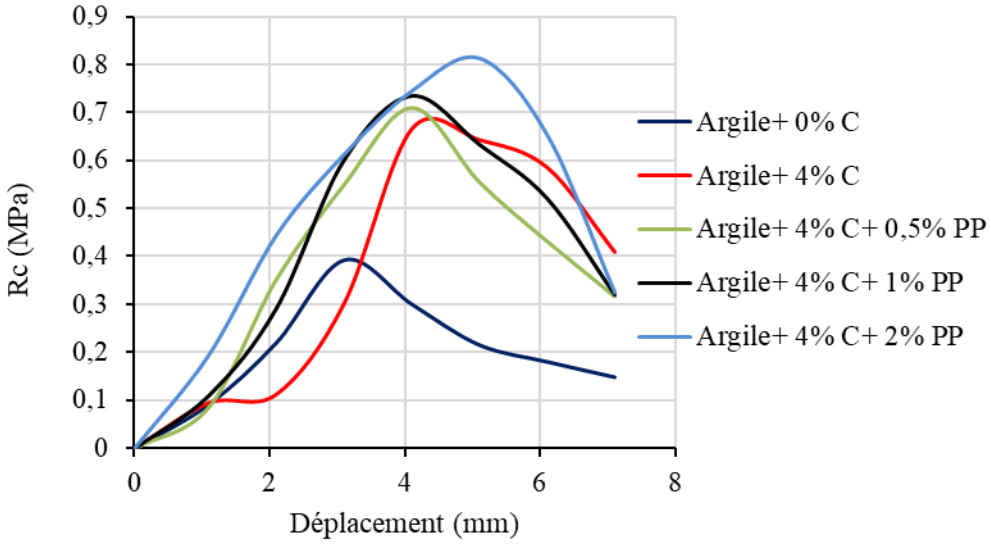


Figure IV.19 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes traitées par 4% chaux à 14jours.

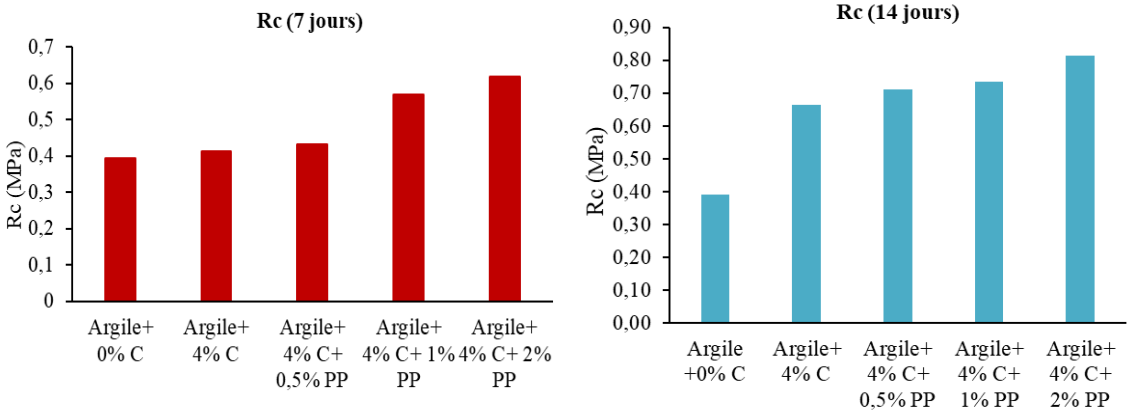


Figure IV.20 : Evolution de la résistance en compression simple d'éprouvettes traitées par 4% chaux à 7 et 14jours.

Tableau IV.5 : Les résultats de la résistance en compression simple obtenus avec 4% de chaux et les differents pourcentages des fibres.

Échantillon		Argile	Argile+4% C	Argile+ 4%C,+0.5%PP	Argile+ 4%C+,1%PP	Argile+ 4%C,+2%PP
Rc (MPa)	7 jours	0,39	0,42	0,43	0,57	0,61
	14 jours	0,55	0,66	0,71	0,733	0,84

C : chaux ; pp fibre de fibres de polypropylène

IV.6 Conclusion

Cette étude expérimentale a été réalisé dans le but de visualise l'effet de l'ajout des fibres de polypropylène sur le comportement mécanique d'une argile traitée par la chaux .A partir des résultats obtenus durant cette étude on sorte par les conclusions suivantes :

-L'étude montre que le dosage 4% c'est dosage optimale de notre matériau étudié ;

-Une diminution de densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimales a été obtenus après l'ajout de 4% de chaux ;

-On note une amélioration considérable dans les paramètres de cisaillement de l'échantillon traité à la chaux ;

-L'addition de chaux au sol argileux produit une augmentation significative de la résistance à la compression simple .Cette augmentation été fonction de dosage et l'âge ;

-l'ajout de fibres de polypropylène produite une diminution de la densité sèche maximale et le teneur en eau optimale de l'argile traité par la chaux ;

-On constate également que l'existence des fibres de polypropylène améliore considérablement les caractéristiques de cisaillement de l'argile, traitée par la chaux plus remarquable sur l'angle de frottement interne ;

-Amélioration considérablement de la résistance à la compression simple de l'argile traitée par la chaux a été obtenus après l'ajout des fibres de polypropylène .

Conclusion générale

Le traitement des sols argileux par la chaux est une solution convenable pour la construction des couches de forme routières et ferroviaires. Cette solution est particulièrement attirante dans les travaux de terrassements des chantiers routiers, ferroviaires et aéroportuaires. Le renforcement des sols traités par des éléments discrets ou des fibres est une solution utilisée en géotechnique dans ce cadre une étude expérimentale été réalisé sur une argile très plastique provenant de la région de Ouezra –Medea traité par la chaux et le fibres de polypropylène . Les fibres ont été ajoutées en déférents pourcentages : 0 ; 0.5 ; 1 ; 2 %, cependant la chaux a été incorporé en 4%, par rapport à la masse totale de l''argile étudié .

Les résultats obtenus dans ce mémoire permettent de voir que l'introduction du chaux et fibres de polypropène dans les sols argileux à un effet considérable sur leur comportement mécanique. Les principales conclusions qui l'on peut tirer à partir de cette étude sont :

- L'étude montre que le dosage 4% c'est dosage optimale de notre matériau étudié ;
- Une diminution de densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimales a été obtenus après le traitement par la chaux ; l'ajout de 4% de chaux produit une diminution de la densité sèche de 9% à sa valeur initial et augmentation de la teneur en eau de un teneur en eau optimale de 12 % à sa valeur initial ;
- L'ajout des fibres de polypropylène à l'argile traitée par la chaux réduit sa sensibilité à l'eau en modifiant les caractéristiques de compactage, en effet la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale diminue ;
- une augmentation de l'angle de frottement et la cohésion a été obtenus après l'ajout de chaux au matériau argileux ;
- Le traitement combiné chaux-fibres polypropylène mécanique améliore considérablement les caractéristiques de cisaillement de l'argile, mais son effet est plus remarquable sur l'angle de frottement interne. L'ajout de 4% de chaux et 2 % de fibres polypropylène produit une augmentation double de l'angle de frottement ;

- L'ajout de chaux au sol argileux produit une amélioration de la résistance à la compression simple est remarquée quel que soit l'âge de l'éprouvette ;

- L’utilisation des fibres de polypropylène produit également une amélioration de la résistance à la compression simple de l’argile traitée par la chaux . Il a été constaté que la résistance en compression à 14 jours varie de 0,669 à 0,843MPa lorsque l'argile est renforcée par les fibres seules avec un dosage de 26%,

Les références bibliographiques

Amroune, A. (2016). Caractérisation du fluage d'une argile expansive reconstituée à faible énergie de compactage, Mémoire master université Mohamed boudiaf-Msila.

Aissiou, F Z. (2010). Étude du phénomène de gonflement dans un sol argileux, Thèse de magister, USTHB.

Ali, M., Mubashir, A., Hamza, M and Madni, M.F. (2020). Engineering properties of expansive soil treated with polypropylene fibers . Geomechanics and Engineering, Vol. 22, No. 3 227-236.

AISSIOU, F.Z. (2010). « Étude du phénomène de gonflement d'un sol argileux». Thèse de magister, Université de science et technologie Houari Boumediene.

Atuonye, O.R., Okeke, O.C., Duru, B.L., and Onuemelu, O.C. (2016). laboratory study of stabilization of expansive soil from amuro-okigwi, southeastern nigeria, with ciment mixtures. and cement/rice husk Aask. International Journal of Environmental Technology Research.

Babatoundé, A., Laibi. (2017). Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses. These de doctorat université de Normandie.

Bourokba, S.A., Mrabent, A., Hachichi, Souli, H., Taibi, S and Fleureau, J.M. (2015). Effect of lime on some physical parameters of a natural expansive clay from Algeria. European Journal of Environmental and Civil Engineering.

Bouguerra, M. Chelali, S. (2021/2022). Stabilisation des sols par des fibres de Polypropylène. Université Mohamed Boudiaf – Msila. Faculté de technologie Département de Génie civil, 64p.

Belabbaci, Z. (2014). Stabilisation des sols gonflants, Thèse de doctorat LMD.UNIV Tlemcen.

Baghadir, B. Larouci, K. (2019). Effets de chlore sodium sur le comportement physicomécanique d'une argile traité à la chaux (cas de la région de Ouezra). Médéa. Uuniversité Yahia Fares Faculté de Technologie département de génie civil Spécialité Géotechniquee, 76P).

Ben Oudina, I. Dahou, A. (07/06/2021). évaluation des tassement sous fondation superficielles, a partir des essais in situ et en laboratoire : exemple d'un sol sable limoneux. Ghardaïa Université de Ghardaïa Faculté des Sciences et de la Technologie Département Hydraulique et Génie Civil, 96P.

Belhamzi, H. 2015. Etude de la stabilité d'un glissement (Cas du PK 21+100 dans le cadre du dédoublement de la RN01 entre Chiffa et Berrouaghia) Thèse de Master en Génie Civil Université de Médéa.

Chibbani, M. Mémoire de magister : Effet de l'instabilité du terrain sur le bâti cas réel de L'université mentouri de Constantine.

Cabalar, A.F., Karabash, Z., Mustafa, W.S. (2014). Stabilising a clay using tyre buffings and lime. Road Materials and Pavement Design.

Dani, S et missoui, A. (2016). Étude physico-chimique de mortier de plâtre à base sable Renforcé de fibres synthétique et végétale. Université Akli Moanda oulhadje-bouira.

Djellali et al. (2012). Behavior of Flexible Pavements on Expansive Soils International Journal of Transportation Engineering.

Derriche, Z. Iguechtal, L. TAS, M. (1989). Comportement des ouvrages dans les argiles expansives d'In-Aménas. REVUE FRANÇAISE DE GÉOTECHNIQUE N° 89.

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

Djellali, A. (2018). Modélisation des chaussées sur sols supports expansible set estimation de la pression de gonflement : Cas de la région de Tébessa (N.E Algérie). Thèse de Doctorat Génie Civil Université Larbi Tebessi – Tébessa

Duc, M. (2020). Les argiles dans le génie civil : pathologies et propriétés remarquables. Habilitation à diriger de recherches. Université Paris Est.

Eisa, M.S., Basiouny, M.E., Mohamady, A and Mira, M. (2022). Improving Weak Subgrade Soil Using Different Additives. Materials 15, 4462. https://doi.org/10.3390/ma15134462.

El-Sobhy M.A., & El-Sayed A. (1981). Some factors affecting swelling of clayey soils. Faculty of Engineering Departement, University of Al-Azhar, Cairo, Egypt.

Hamza, M., Ijaz, N., Fang, CH and Ijaz, Z. (2022). Stabilization of Problematic Expansive Clays Using Polypropylene Fiber Reinforcement Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 16, No. 4, 2022.

Harichane, K., Ghrici, M. and Kenai, S. (2011a). Effect of curing period on shear strength of cohesive soils stabilized with combination of lime and natural pozzolana, International Journal of Civil Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 90–96.

Hatim, A., Mostafa, M. (2018). The effects of lime content and environmental temperature on the mechanical and hydraulic properties of extremely high plastic clays. Applied Clay Science Applied Clay Science 161 ; 203–210

Hotineanu, A., Bouasker, A., Aldaood, A., Muzahim, A. (2015). Effect of freeze–thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays. Cold Regions Science and Technology 119 ; 151–157.

Houmadi, Y et al. (2009). « Swelling and Geotechnical Cartography of Saida Soils ». Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 3, No. 1.

Hussein, S.A., Ali, H.A. (2019). Stabilization of Expansive Soils Using Polypropylene Fiber Civil Engineering Journal Vol. 5, No. 3.

Ikhlef, N.S., Ghembaza, M.S., Dadouch, M. (2015). Effect of Treatment with Cement on the Mechanical Characteristics of Silt from Telagh Region of Sidi Belabes,

Algeria. Geotech Geol Eng (2015) 33:1067–1079.

Gay, G., Schad, H. (2000). Influence of cement and lime additives on the compaction properties and shear parameters of fine grained soils. Otto-Graf Journal, Vol. 11, pp. 19-31.

Goufi, A.E., Harichane, K.H., Harichane, Z., Ghrici., Driss, A.A.E. (2022). Improvement of the geotechnical properties of a clay–sand mixture treated with lime. Innovative Infrastructure Solutions7:114.

Ghobadi, M.H. Abdilor, Y. Babazadeh, R. (2014). Stabilisation of clay soils using lime and effect of pH variations on shear strength parameters. Bull Eng Geol Environ (2014) 73:611619.

Garzón, E., Cano, M., O`Kelly, B.C., Sánchez-Soto, P.J. (2016). Effect of lime on stabilization of phyllite clays. Appl. Clay Sci. 123, 329–334. https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.01.042.

Kahlouche, H. (2022), étude de comportement mécanique des argiles sous l'effet des produits chimiques. Thèse de doctorat Université de Guelma.

KHEMISSA. MEKKI, L. (2007). CARACTERISATION DES ARGILES EXPANSIVES DE M'SILA Algérie. Colloque « Sols et Matériaux à Problèmes » - 9-11 février 2007 – Tunisie.

Mehenni, A. (2015). Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traitée. these de doctorat Université de lorraine.

Morel, R. (1996). Les sols cultivés. Lavoisier, Paris.

Mouroux, P. Magron, P. PinteJ, C. (1987). La construction économique sur sols gonflants, Manuel et Méthodes n 14 Ed. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans.

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

Nassah, D. (2017). Influence de la quantité de fibres naturelles (alfa) et commerciales (polypropylène) sur les propriétés physicomécaniques des mortiers fibrés, universite m'Hamed bougara-boumerdes.

Omar sadoui et al. (2012), Analyse d'un cas pathologique de silos de stockage sur sols compressible à bejaia. 1stInternational Conference on Civil Engineering, 8-9 May 2012, Laghouat University, Algeria.

Prasad, C.R.V., Sharma, R.K. (2014). Influence of sand and fly ash on clayey soil stabilization. Journal of Mechanical and Civil Engineering 4, 36–40.

Rouag, H. (2014). Fabrication de fibre technique nanocomposite à base de polymère thermoplastique mémoire de MAGISTER UNIVERSITE SETIF.

Robitaille et Denis, T. (1997). Mécanique de sol : théorie et pratique. ISBN 2-89113-658-Reiffesteck, P. (1999). Les sols gonflants en génie civil. Thème GEO37 sujet de recherche 1.37.019 pole géotechnique, laboratoire central de ponts et chausses. 127 pages).

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

Reiffesteck, P. (1999). Les sols gonflants en génie civil. Thème GEO37 sujet de recherche 1.37.019 pole géotechnique, laboratoire central de ponts et chausses. 127 pages).

Saadi, (2016-2017). Stabilisation des sols gonflants avec la chaux. Cas de la région de MILA, Université Larbi Ben Mhidi Oum El Bouaghi Faculté Des Sciences Et Sciences Appliquées Département De Génie Civil.

Taallah, Bachir. (2014). Etude du comportement physique-mécanique Du bloc de terre comprimée avec fibres. Thèse de Doctorat université Mohamed khider – BISKRA.

Trudeep, N., Dhavalkumar, D Patel, Gafur, S and Nirmal, P. (2019). Use of Polypropylene Fibres for Cohesive Soil Stabilization Conference Paper.