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 de polypropylène sur le comportement mécanique d'une argile plastique traitée par le sable

---

Présenté par

RAHALI Manel

BENCHOUCHA Meriem

Proposé et Dirigé par

Dr : AMRI Salima

Promotion 2024/2025


بسم الله الرحمن الرحيم
صلى الله محمد

Remerciements

Au terme de ce parcours académique , je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué , de près ou de loin , à la réussite de mes 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.
Je tiens également à remercier ma famille , en particulier mes parents , pour leur soutien inconditionnel , leurs encouragements constants et leur patience .Leur présence a été une source de motivation essentielle dans les moments de complicité et l'entraide qui ont marqué ce parcours .

Nous n'oublierons jamais à remercie Mr AMEUR Douifi , le directeur de laboratoire SETAM 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.

Enfin , je n'oublie pas toutes les personnes qui , de près ou de loin , ont contribué à mon épanouissement personnel et professionnel durant ces années d'études .

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chers parents , pour leur amour inconditionnel , leur soutien sans faille et leurs sacrifices constants qui m'ont permis d'aller au bout de mes études.

A me frère et sœurs , pour leur présence , leur encouragement et leur confiance en moi.

Atouts mes enseignants qui su éveiller ma curiosité , me guider et m'inspirer tout au long de ce parcours.

A Mr Douifi , le directeur de laboratoire SETAM Avec les ingénieurs et les techniciens du laboratoire Zola, Ahmed, Mohammed , Karima,Lamya , Rodwene, soumia et Lakhdar

Enfin , à tous ceux qui ont cru en moi , même dans les moments de doute .ce travail est aussi le vôtre.

Manel

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à : Mes chers parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé.

Mes sœurs Nour el houda et Sabrine pour leur aide, conseils et encouragements.

Tous mes amis pour leur compagnie.

Enfin a tous ceux qui me sont cher et qui m'ont aidé de prés ou de loin.

Meriem

Résumé

Les sols argileux caractérisent par une plasticité élevés et une sensibilité à la variation de la tenue en eau, se traduisant par une portance médiocre, une compressibilité excessive, engendrant ainsi des désordres structurels importants. Divers techniques d'amélioration des sols argileux utiliser pour améliore leurs caractéristiques et permettant leur réemploi. Ces traitements, souvent réalisés par des méthodes chimiques , physiques , mécaniques . Dans cette étude, un sol argileux provenant de Haouch Bayazid dans la wilaya de Médéa, Algérie, traitée par le sable de dune à différents pourcentage (0 ; 15% 30%) puis cette argile traitée est renforcé par des fibres de polypropylène. Les fibres ont été incorporées dans l'argile traitée en différents pourcentages: 1 et 2% par rapport à la masse sèche du sol. . En effet, les résultats obtenus ont conduit à l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques lorsque le sable de dune est ajouté, on constaté aussi l'effet positif de l'ajout des fibres de polypropène sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques de l'argile traitée par le sable dune .

Mots-clés : argile ,sable, traitement, renforcement fibre de polypropylène, comportement mécanique, géotechnique.

Abstract

Clay soils are characterized by high plasticity and sensitivity to variation in water content, resulting in poor bearing capacity, excessive compressibility, thus causing significant structural disorders. Various techniques for improving clay soils are used to improve their characteristics and allow their reuse. These treatments, often carried out by chemical, physical, mechanical methods. In this study, the clay soil from Haouch Bayazid of Médéa, Algeria, treated with dune sand at different percentages (0; 15% 30%) then this clay treated is reinforced with polypropylene fibers. The fibers were incorporated into the treated clay in different percentages: 1 and 2% relative to the dry mass of the soil. Indeed, the results obtained to improvements in physical and mechanical characteristics when dune sand was added. The addition of polypropylene fibers also demonstrated a positive effect on the mechanical characteristics of clay treated with dune sand.

Keywords: clay, sand, treatment, polypropylene fiber reinforcement, mechanical behavior, geotechnical.

ملخص

تتميز التربة الطينية بمرونتها العالية وحساسيتها لتغير محتوى الماء، مما يؤدي إلى ضعف قدرتها على التحمل، وزيادة قابليتها للانضغاط، مما يُسبب اضطرابات هيكلية كبيرة. تُستخدم تقنيات متنوعة لتحسين خصائص التربة الطينية، بما يسمح بإعادة استخدامها. غالبًا ما تُجرى هذه المعالجات بطرق كيميائية وفيزيائية وميكانيكية. في هذه الدراسة، تمت معالجه تربة طينية من حوش بايزيد بولاية المدية، الجزائر، برمل الكثبان بنسب مختلفة (0%, 15% ,30%)، ثم عُزز هذا الطين المُعالج بألياف البولي بروبيلين. أضيفت الألياف لطين المُعالج بنسب مختلفة: 1% ,2% بالنسبة للكتلة الجافة للتربة. أدت النتائج المُتحصل عليها إلى تحسين في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية وذلك عند إضافة رمل الكثبان كما أظهرت إضافة ألياف البولي بروبيلين تأثيرًا إيجابيًا على الخصائص الميكانيكية للطين المُعالج برمل الكثبان .

الكلمات المفتاحية: طين، رمل، معالجة، تسليح بألياف البولي بروبيلين، السلوك الميكانيكي، الجيوتقنية.

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.....5

I.3.1 Unité structurale tétraédrique 5

I.3.2 Unité structurale octaédrique 6

I.4 Classification des argiles..... 6

I.5 Les principaux types de minéraux argileux.....7

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 Surface spécifique 9

I.6.2 .Attraction entre les minéraux argileux et l'eau 10

I.6.2.1. Activité électrochimique à la surface des minéraux argileux…….

I.6.2.2. Polarité de l'eau 11

I.6.3. Capacité d'échange cationique 11

I.6.4. Capacité de gonflement et d'adsorption 12

I.7. Phénomène du retrait – gonflement 12

I.7.1. Composantes mécaniques du gonflement 12

I.7. 2 Types de gonflement 13

a) Gonflement inter particulaire 13

b) Gonflement inter foliaire 13

I.7. 3 Les paramètre du gonflement 13

a- Potentiel de gonflement 13

b- Pression de gonflement 14

c- Amplitude du gonflement 14

I.7.4. Méthode de détermination des paramètres de gonflement 14

I.7.4.1. Les méthodes directes 14

I.7.4.2. Les méthodes indirectes 14

I.7.5. Méthodes indirectes de classification des sols gonflants 14

a- Classification à base des limites d'Atterberg 15

b- Classification à base des limites de retrait 15

c- Classification à base de la surface spécifique 15

I.8. Dommages et pathologie des ouvrages fondés sur sols gonflants 16

1.8.1. Conséquences dues au gonflement 16

a- Cas des bâtiments 16

b- Cas de chaussée 19

I.8. Conclusion 20

Chapitre II : Techniques de traitement des sols

II.1 Introduction 23

II.2 Traitement des sols 23

II.2 .1.Traitement mécanique 23

II.2 .1.1.Compactage 23

a- Compactage de surface 24

b- Compactage Dynamique 24

II.2 .2. Traitement chimique 25

II.2.2.1 Traitement par la chaux 25

II.2.2.1.1 Mécanisme de traitement à la chaux 26

a- Échange cationique 26

b- Floculation 26

c- Carbonatation 26

d- Réaction pouzzolanique 27

II.2.2.1.2 Effets de l'ajout de chaux sur les propriétés géotechniques des sols argileux 27

II.2.2.2 Traitement par le ciment 29

II.2.2.1 Effet de l'ajout de ciment sur les caractéristiques géotechniques des sols argileux 29

II.2.3 Traitement physique 30

II.2.3.1 Sable 30

II.3. Technique de renforcement des sols par fibres 31

II.3.1. Les fibres 32

II.3.2. Classification des fibres 32

II.3.2.1. Fibres naturelles 32

II.3.2.2. Fibres synthétiques 33

II.3.2.3. Fibres de polypropylène 34

II.3.3. Effet des fibres de polypropylène sur les caractéristiques géotechniques des sols argileux 34

II.4 .Conclusion 36

Chapitre III : Identification des matériaux

III.1 Introduction 38

III.2 Situation géographique de la région d'étude 38

III.2 Matériaux utilisés.....38

III.2.1 Argile 38

III.2.2 Sable.....39

III.2.3. Fibres 40

III.3. Méthodes expérimentales.....40

III.4 .Préparation d'échantillon 41

III.5 .Caractéristiques géotechniques des sols étudiés 42

III.5 .1 Argile.....42

III.5.1.1 Caractéristiques chimiques..... 42

III.5.1.1.1. Analyse chimique 42

III.5.1.1.2 Mesure de PH..... 43

III.5.1.1.3 Essai du bleu de méthylène 44

III.5.1.2 Caractéristiques physiques 45

III.5.1.2.1 Teneur en eau naturelle 45

III.5.1.2.2 Densité humide.....46

III.5.1.2.3 Analyse Granulométrique..... 47

III.5.1.2.4 Limites de consistances 49

III.5.1.3 Caractéristiques mécaniques 52

III.5.1.3.1 Essai de Proctor normal..... 52

III.5.3.2 Essai de cisaillement à la boite de Casagrande.....54

III.5.1.3.3 Essai Œdométrique 55

III.5 .2. Sable.....57

III.5.2.1. Caractéristiques Chimiques.....57

III.5.2.1.1 Analyse chimique 57

III. 5.2.1.3 Essai du bleu de méthylène 58

III.5.2.2. Caractéristiques physiques 58

III.5.2.2.1. Densité sèche 58

III.5.2.2.2. Equivalent de Sable 58

III.6 Conclusion.....60

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV. Introduction 62

IV.2 préparation de mélange 62

IV.3. Résultats et discussion.....63

IV.3.1. Effet de l'ajout de sable de dune sur les paramétrés géotechnique d'une argile ……...63

IV.3.2. Renforcement par fibres de polypropylène une argile traitée par le sable 74

IV.4. Conclusion.....80

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 technique de la fibre utilisée 40

Tableau III.2 : Les différents essais effectués 41

Tableau III.3 : Résultats de l'analyse chimique 42

Tableau III.4 : Classification des sols en fonction du pourcentage 42

Tableau III.5 : Résultat de la valeur du bleu de méthylène 45

Tableau III.6 : Qualificatif l'activité de la fraction argileuse selon le coefficient VBS 45

Tableau III.7 : Résultat des limites d'Atterberg… 51

Tableau III.8: Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA-LCPC 1992) 52

Tableau III.9 : Résultat de l'essai Proctor normal 54

Tableau III.10 : Résultat de l'analyses chimique de sable 58

Tableau III.11 : Résultat de l'Essai bleu méthylène de sable 58

Tableau III.12 : Classification des sols en fonction de l'équivalent de sable 59

Tableau IV.1 : Limites de consistances des différents mélanges (argile +sable de dune) 64

Tableau IV.2 : Résultats de l'essai de valeur de bleu méthylène des mélanges argile-sables de dune 67

Tableau IV.3 : Influence de l'ajout de sable sur les paramètres de Proctor 69

Tableau IV. 4 : Valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement interne pour les mélanges(argile +sable) 71

Tableau. IV. 5 : Effet de l'ajout de sable dune sur les paramètres de compressibilité 73

Tableau IV. 6 : Influence de l'ajout de sable et des fibre PP sur les paramètres de Proctor. ……74

Tableau IV. 7: Valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement interne pour les mélanges(argile +sable+ fibres pp) 76

Tableau. IV. 8 : Effet de l'ajout de fibres PP et sable dune sur les paramètres de compressibilité..... 79

Liste des figures

Figure I.1 : représentation de la couche tétraédrique (Harrat,2007).....6

Figure I.2 : représentation de la octaédrique (Harrat,2007)..... 6

Figure I.3 : structure atomique de la kaolinite (Grim ,1959) 7

Figure I.4 : : structure atomique de l'illite (Grim ,1959 8

Figure I.5 : structure atomique de la Montmorillonite (Grim ,1959)..... 9

Figure I.6 : Structure particulaire du chlorite 9

Figure I.7 : Schéma de molécule d'eau… 11

Figure I.8 : Perte de verticalité des studios, provoquée par un gonflement différentiel du sol (Derriche et al, 1989) 18

F**igure I.9 :** cas pathologique dans la ville de Saida (Houmadi, 2006) 18

Figure I.10: Pathologie des maçonneries due aux variations volumiques du sol de fondation (Khemissaetal, 2007) 18

Figure I.11 : rupture et fissuration du mur de l'hôpital d'Ain Amenas (Bellatrache 2012) …..18

Figure I.12 : des cas pathologiques dans certain région de la wilaya de Batna (ben yahia ,2022).....19

Figure I.13 : déformation d'une chaussé sur un sol support gonflant dans la ville de tébessa (djellali at all 012))..... 20

Figure I.14 : dommage de gonflement dans la région d' Oum – Elbouaghi (Bekhoche , 2018).....20

Figure II.1: Stabilisation par compactage de surface (cas d'un projet de chemain de fer RTT, wilaya de Tiart , Algérie , ETRHB , 2017) 24

Figure II.2 : compactage dynamique 25

Figure II.3 : fibres de chanvre 33

Figure II.4 : fibres de polypropylène 34

Figure III.1 : Localisation du site étudie (Google Map)..... 38

Figure III.2 : Sable de dune de wilaya de Djelfa..... 39

Figure III.3 : Les fibres polypropylène 42

Figure III.4 : Préparation d'échantillon..... 43

Figure III.5 : Analyse chimique 43

Figure III.6 : Essai Ph mètre 44

Figure.III.7 : Essai de bleu méthylèn..... 46

Figure III.8 : Essai de la teneur en eau..... 46

Figure III.9 : Essai de de la densité 47

Figure III.10 : L'essai de L' analyse granulométrique par tamisage..... 48

Figure III.11 : : L'essai de L' analyse granulométrique par sédimentométrie..... 49

Figure III.12 : Courbe d'analyse granulométrique..... 50

Figure III.13: Détermination de limite de liquidité..... 50

Figure III.14 : courbe de Limite de liquidité..... 50

Figure III.15 : Détermination de limite de plasticité..... 52

Figure III.16 : Classification des sols selon l'abaque de Casagrande 53

Figure III.17 : Réalisation de l'essai Proctor normale..... 54

Figure III.18 : Courbe Proctor normal..... 55

Figure III.19 : Essai de cisaillement rectiligne à la boite 55

Figure III.20 : Courbe contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale..... 55

Figure III.21: Contraintes de cisaillement en fonction de déplacement horizontal..... 56

Figure III.22 : Essai œdométrique3… 57

Figure III.23 : Courbe essai œdométrique..... 59

Figure III.24 : Essai équivalent sable..... 69

Figure IV.1 : Préparation de mélanges..... 63

La figure IV.2 : Courbe d'analyse granulométrique des mélanges (argile +sable de dune)

……..64

Figure IV.3 : Influence de sable de dune sur les limites de consistances 66

Figure IV.4 : Classification des mélanges (argile + sable de dune) dans l'abaque.....67

Figure. IV.5 : Influence de sable de dune sur le volume de bleu de méthylène 68

Figure. IV. 6 : Influence de sable de dune sur la surface spécifique totale.....68

Figure. IV.7 : Résultats de l'essai de Proctor pour les mélanges argiles- sable de dune …… 69

Figure. IV. 8 : Effet de l'ajout de sable sur la densité sèche maximale 70

Figure. IV. 9 : Effet de l'ajout de sable sur la teneur en eau optimal.
….....70

Figure IV.10 : Influence de sable de dune sur la contrainte de cisaillement des mélanges (argile +sable)..... 71

Figure. lV. 11 : Effet de l'ajout de sable dune sur l'angle de la cohesion
….....72

Figure. lV. 12 : Effet de l'ajout de sable de dune sur l'angle de frottement 72

Figure. IV. 13 : Influence de sable de dune sur l'essai de compressibilité sur les mélanges.....73

Figure. IV.14 : Résultats de l'essai de Proctor pour les mélanges argiles- sable de dune +fibres
pp 75

Figure. IV. 15 : Effet des fibres pp et le sable de dune sur la densité sèche maximale
….....76

Figure IV.16 : Effet de l'ajout de chaux et les fibres PP sur l'angle de frottement interne 76

Figure. IV. 17 : Influence des fibres pp et sable de dune sur la contrainte de cisaillement.....77

Figure. IV. 18 : Effet de fibres pp sur la cohésion d'une argile traitée par le sable
….....78

Figure. IV. 19 : Effet de fibres pp sur l'angle de frottement d'une argile traitée par le sable 78

Figure. IV. 20 : Influence de l'ajout de fibres pp et le sable de dune sur les paramètres de l'essai oedométrique..... 80

Introduction générale

Introduction générale

L'une des principales responsabilités des ingénieurs géotechniciens est la stabilisation du sol fin. 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 sable 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 par le sable de dune . 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 surle comportement mécaniques d'un sol argileux traitée par le sable de dune .

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

Chapitre I

Généralité sur les argile

I.1 Introduction

Les argiles sont des minéraux naturels utilisés par l'homme depuis des millénaires du fait de leur abondance et de leurs propriétés remarquables qui les destinent à de multiples applications : matériaux de construction, céramiques, moules pour la métallurgie, fabrication des ciments, , cosmétique. Les sols argileux sont constitués de minéraux variés avec la variation de la teneur en eau . Une humidification de ces sols à partir d'un certain état induit des gonflements importants dus, pour une part à la saturation progressive des pores du sol, qui fait disparaître les forces capillaires, et d'autre part, à l'absorption de molécules d'eau sur la surface extérieure des particules d'argile et à la pénétration de ces molécules entre les feuillets d'argiles. En géotechnique l'argile est considéré en tant que terrain naturel dans les problèmes de stabilité des pentes, de fondations superficielles profondes, d'excavations (déblais, fouilles, tunnels, chaussée etc.). Les différents dégâts trouvent leur origine dans des facteurs de prédisposition relatifs à la composition minéralogique et la texture des argiles.

Dans ce chapitre nous avons présentés une synthèse bibliographique sur les minéraux argileux qui constituent le plus grand pourcentage des minéraux recensés sur terre, leur structure élémentaire de base et le comportement des sols argileux : Gonflement, retrait et tassement et le mécanisme de gonflement en particulier, on cite aussi les conséquences dues au gonflement et tassement en Algérie.

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).

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). Dans le domaine du génie civil et de la construction, le champ d'utilisation des argiles est vaste tant leurs propriétés sont intéressantes et leur disponibilité quasi illimitée. Les argiles sont utilisées pour leurs propriétés remarquables:

• Comme matière première pour des matériaux de construction : brique, tuile ou matériau terre crue pour la construction, source d'alumine et de silice dans la fabrication par calcination du clinker, de la fibre de verre, de liant géopolymérique et de pouzzolane (ces derniers sont des alternatives au ciment portland), dans la fabrication du plâtre, de granules pour revêtements de toiture (kaolinite)…

• Pour sa rhéologie (thixotropie) : les montmorillonites (bentonites) sont utilisées pour la réalisation d'ouvrages de travaux publics principalement le creusement des tunnels par tunneliers à pression de boue et l'exécution des excavations dites à parois moulées.

• Produit d'étanchéification grâce à ses propriétés de gonflement ce qui induit une faible perméabilité. Les bentonites sont utilisées pour former des bouchons de scellement des galeries et des puits en contact avec les aquifères encaissant (Duc ,2020).

I.3 Minéraux argileux

Les minéraux argileux sont des silicates d'alumines, qui ont des structures phylliteuses particulières et se distinguent par leur nature chimique. Cette structure est le résultat de superposition des couches tétraédriques de silice et des couches structurales octaédriques d'hydroxydes d'aluminium ou de magnesium.

I.3.1 Couche tétraédrique

La structure d'un tétraèdre est l'union de quatre triangles formant quatre têtes (atomes) d'oxygène (O_2^+)ou d'hydroxyle (OH^-), et un atome de silicium (Si_4^+) qui se positionne au centre de cette structure. Comme l'indique la figure I.1. Les atomes d'oxygène sont connus sous le nom d'oxygène basal qui connectent les paires de tous les tétraèdres ensemble dans un plan, alors que le quatrième atome d'oxygène reste libre et forme la liaison avec d'autres éléments polyédriques connus sous le nom d'oxygène apical. Les oxygènes apicaux sont tous dans un plan séparé et fournissent un lien entre les deux tétraèdres et la feuille octaédrique. Comme chaque tétraèdre contient un seul oxygène apical, il lui permet de partager un coin avec un octaèdre dans le feuillet octaédrique. Les cations tétraédriques courants sont (Si_4^+), Al_3^+ et Fe+3.

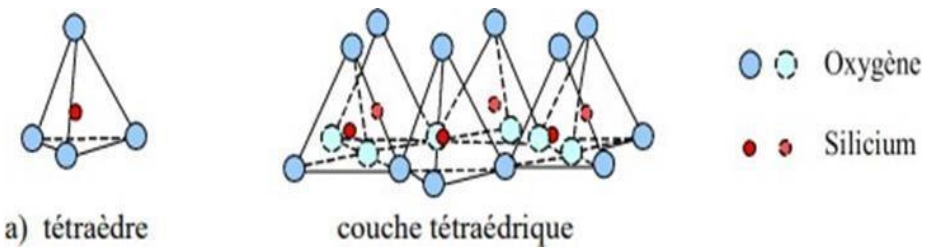


Figure I.1: Représentation de la couche tétraédrique (Harrat ,2007)

I.3.2 Couche octaédrique

Un octaèdre est l'union de huit triangles formant six têtes, ces têtes sont des atomes d'oxygène (O_2^+) ou d'hydroxyle (OH^-), qui entoure un atome d'aluminium (Al_3^+) ou de magnésium (Mg_2^+) qui se positionne au centre de cette structure (figure I. 2). Dans le feuillet di-octaédrique, Al_3^+ est l'atome dominant par conséquent l'aluminium ayant trois valences positives est présent dans le feuillet octaédrique, afin que les charges soient équilibrées seuls deux tiers des sites sont remplis. Lorsque du magnésium ayant deux valences de charge positive est présent, les trois positions sont remplies pour équilibrer la charge, ce qui entraîne la formation d'un feuillet tri octaédrique, où(Mg_2^+) est l'atome dominant principal

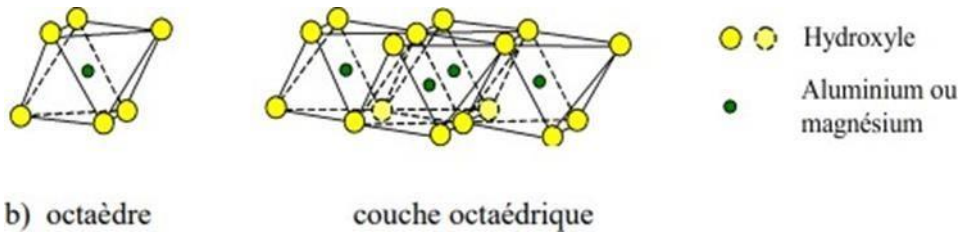


Figure I.2: Représentation de la couche octaédrique (Harrat ,2007).

I.4 Classification des argiles

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

- ***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.

- ***Les minéraux* (TOT ou 2 :1)** - Le feuillet fortement ou faiblement chargé est constitué de deux couches T tétraédriques siliceuses avec substitutions isomorphiques et d'une couche octaédrique alumineuse (ou magnésienne, ferreuse…) pouvant également être substituée. La distance interfeuillet est soit fixe, soit variable et des cations compensateurs de la charge sont présents dans l'interfeuillet soit K, soit Ca ou Na….respectivement.

- ***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 interfeuillet. 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

I.5.1 Kaolinite

La kaolinite consiste à répéter des couches de feuilles élémentaires de silice-ruban dans un réseau 1:1 (figure I.3) . Les atomes dans un cristal sont disposés d'une manière ordonnée définie pour former un réseau tridimensionnel, appelé un «réseau». L'unité de base de kaolinite est une unité à deux couches qui est formée en empilant une feuille de gibbsite sur une feuille de silice, ces unités de base sont ensuite empilées les unes sur les autres pour former un réseau de minéraux, les couches sont maintenues ensemble par une liaison hydrogène, la forte liaison ne permet pas à l'eau de pénétrer dans le réseau. Ainsi, les minéraux de kaolinite sont stables et ne se dilatent pas sous saturation.

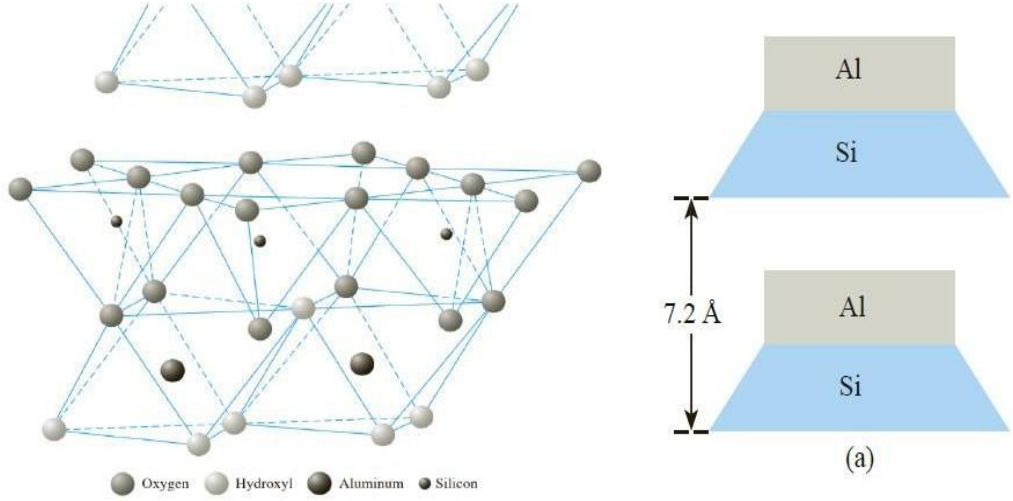


Figure I.3 : Structure atomique de la kaolinite (Grim, 1959).

I.5.2 Illite

Se compose d'une feuille de gibbsite collée à deux feuilles de silice, une en haut et une en bas. Il est parfois appelé mica argileux. Les couches illites sont liées par des ions potassium La charge négative pour équilibrer les ions potassium provient de la substitution de l'aluminium par du silicium dans les feuilles tétraédriques (figure I.4). La liaison avec les ions K_+ non échangeables est plus faible que la liaison hydrogène dans la Kaolinite mais est plus forte que la liaison eau de la montmorillonite. Le cristal d'illite ne gonfle pas autant en présence d'eau que dans les particules de de montmorillonite.

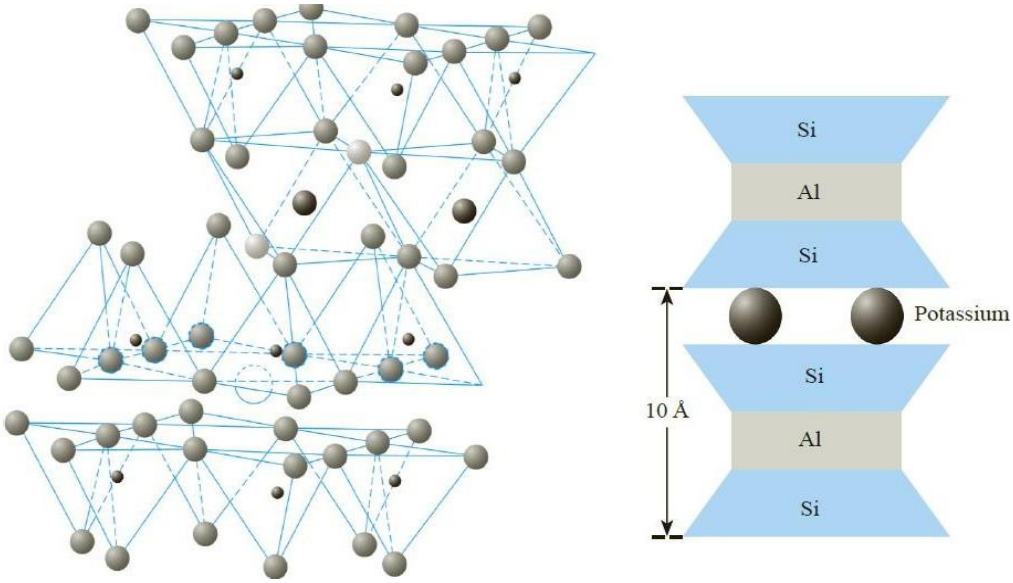


Figure I.4 : Structure atomique de l'illite (Grim, 1959).

I.5.3 Montmorillonite

A une structure similaire à celle de l'illite, c'est-à-dire une feuille de gibbsite prise en sandwich entre deux feuilles de silice. Dans la montmorillonite, il existe une substitution isomorphe du magnésium et du fer pour l'aluminium dans les feuilles octaédriques (figure I.5). La surface spécifique est d'environ 800 m2/g. Les ions potassium ne sont pas présents comme dans l'illite, et une grande quantité d'eau est attirée dans l'espace entre les couches. Il existe un gonflement tinter couche, qui est très important pour la pratique de l'ingénierie (Goufi ,2022).

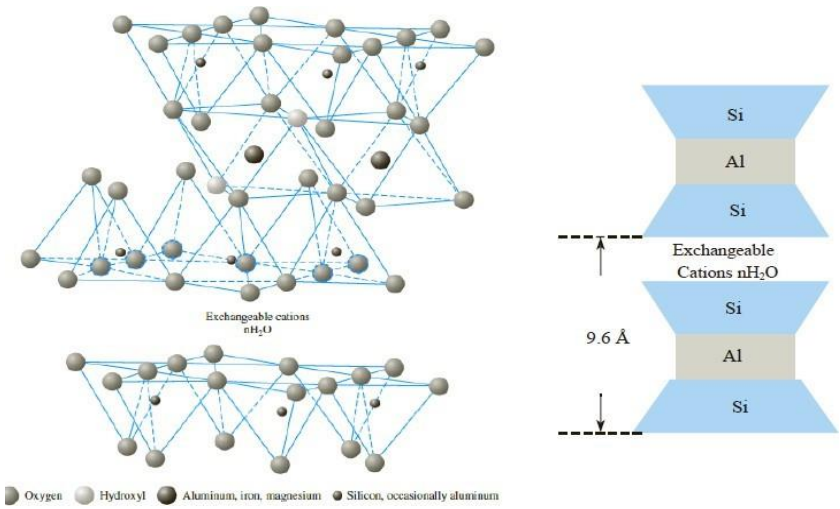


Figure I.5 : Structure atomique de la montmorillonite (Grim, 1959).

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.

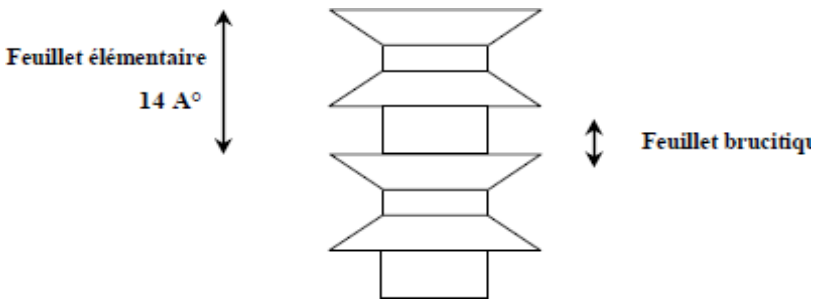


Figure I.6 : Structure particulaire du chlorite.

I.6 Principales caractéristiques des minéraux

Les principales caractéristiques des minéraux argileux qui influent sur le gonflement sont :

- Formes et surfaces spécifiques.
- Attraction entre les minéraux argileux et l'eau .
- Capacité d'échanges cationiques.
- Capacité de gonflement et d'adsorption.

I.6.1. Surface spécifique

La surface spécifique des argiles est composée de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé. Les caractéristiques des 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.6.2 .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.6.2.1. 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.6.2.2. 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.

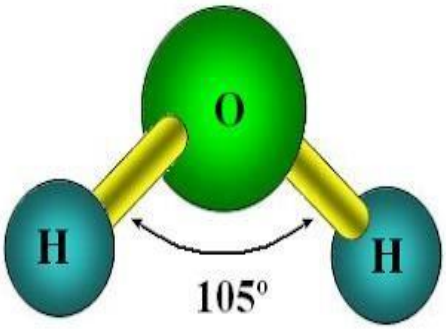


Figure I.7 : Schéma de molécule d'eau.

I.6.3. Capacité d'échange cationique

Les argiles ont la capacité de fixer de façon réversible des cations en solution, la capacité d'échange cationique et définie comme étant la concentration totale des sites superficiels disponibles aux cations. Ce paramètre est exprimé en quantité de charge par unité de masse milliéquivalents pour 100g (meq /100g). Le principe général d'évaluation de la capacité d'échange cationique (CEC) consiste à mesuré la quantité totale fixée d'un cation indicateur introduit en excès dans une suspension argileuse. Cette mesure est souvent réalisée à pH fixe

puisque la capacité d'échange cationique est tributaire aussi du pH .

I.6.4. Capacité de gonflement et d'adsorption

Généralement, toutes les argiles possèdent une capacité de former facilement des complexes lamellaires par l'insertion des molécules d'eau ou organique dans l'espace inter foliaire. Ce phénomène est appelé gonflement, le degré de gonflement ou degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre. Les smectites, les vermiculites et les minéraux inters stratifiés sans parmi les argiles qui se caractérisent par une capacité d'expansion beaucoup plus importante que celles des autres espèces argileuse. L'incorporation d'eau est réversible à la pression atmosphérique et dépend de la température et de l'humidité relative (la pression de vapeur d'eau) de l'air: plus l'air est humide, plus l'argile pourra incorporer de l'eau jusqu'à sa limite de saturation. (Robitaille et Tremblay ,1997).

I.7. Phénomène du retrait – gonflement

Les phénomènes de retrait-gonflement de certains sols argileux induisent des tassements différentiels à cause de la variation de la teneur en eaux aux sols qui se manifestent par des désordres affectant principalement le bâti individuel. Le gonflement est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux (Montmorillonites, saponites et autres nontronites) ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse. Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes et varient en fonction de leur teneur en eau), la variation de volume d'un terrain est consécutif à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle) et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs)

I.7.1. Composantes mécaniques du gonflement

Dans la masse du sol gonflant, sous l'action d'un chargement, certaines particules se trouvent déformées selon deux chemins de déformations : La compression volumétrique des particules solides, souvent négligeables. L'approche mécanique du gonflement est analogue à l'extension mécanique et est reliée à l'énergie emmagasinée dans la structure solide (Terzaghi, 1941), dans cette approche l'imbibition par l'eau est attribuée à un gradient hydrostatique induisant un écoulement de l'eau à travers l'échantillon, ce qui provoque une diminution de la succion matricielle et par conséquent un déchargement de la masse du sol.

I.7. 2 Types de gonflement

D'après Mouroux et al (1988) ont distingué deux types de gonflements, un gonflement intra particulaire (inter foliaire) et un gonflement inter particulaire.

Gonflement inter particulaire : Le gonflement inter particulaire peut se manifester dans toutes les familles d'argiles. C'est un processus de réaction entre l'eau ionisée et les groupes de feuillets argileux dénommés plaquettes. Lorsque les dipôles d'eau se fixent sur l'ensemble des surfaces des plaquettes, le gonflement se manifeste.

Gonflement inter foliaire : La structure minéralogique de certaines argiles, telles que les smectites et quelques chlorites, permet l'admission de molécules d'eau entre les feuillets. En effet, leur distance inter foliaire est suffisamment grande pour permettre l'inclusion de molécules d'eau. Selon Didier (1972), l'eau pénètre entre les feuillets à l'intérieur des particules, et s'organise en couches mono moléculaires. Compte tenu de la grandeur des espaces inter foliaires, le gonflement s'y référent est nettement plus grand que celui inter particulaire. En fait, chaque distance inter foliaire est augmentée. La multitude des distances amplifie le résultat.

I.7. 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- 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.

d- 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.7.4. Méthode de détermination des paramètres de gonflement

I.7.4.1.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.

I.7.4.2. 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.7.5. Méthodes indirectes de classification des sols gonflants

Il existe plusieurs méthodes indirectes d'estimation des parametres de gonflement, comme le montre une synthèse récente effectuée par et Adem et Vanapalli (2015). Ceci consiste à conduire des corrélations entre le gonflement libre ou la pression de gonflement et quelques

paramètres géotechniques. Ainsi, après la détermination de ces paramètres, l'emploi des formules empiriques permet de connaitre rapidement le potentiel de gonflement du terrain, c'est-à-dire d'estimer si ce potentiel est faible, moyen ou élève, et si le phénomène est à prendre en compte ou non. Compte tenu de la structure minéralogique des différents types d'argile, la caractérisation de la surface spécifique d'argile représente aussi un élément essentiel pour différencier le potentiel de gonflement d'un matériau. Quelques approches empiriques sont détaillées ci-après.

a- Classification à base des limites d'Atterberg

Sur le plan microscopique, le gonflement est synthétisé par un mécanisme d'interactions physico-chimiques entre l'eau et le minéral argileux, qui est celui de la fixation des molécules d'eau pour l'hydratation des cations échangeables, et la compensation du déficit de charges électroniques du minéral. Sur le plan macroscopique, cette interaction eau-solide et régie par les limites d'Atterberg. En effet, l'indice de plasticité IP = WL -Wp, peut s'interpréter comme la quantité relative d'eau nécessaire pour faire passer un sol de l'état plastique à l'état liquide. Ce passage correspond à la saturation progressive de la capacité d'absorption. Plus le sol possède de minéraux actifs dans l'interaction avec l'eau, plus il sera nécessaire d'ajouter de l'eau au sol pour qu'il devienne liquide. Dans le cas où une grande partie de cette eau sera absorbée par les particules, le matériau passe à un état pâteux, correspondant à la phase plastique.

b- Classification à base des limites de retrait

Les sols argileux présentent un retrait volumique lors de l'évaporation de l'eau interstitielle qui évolue de manière linéaire, en fonction de la teneur en eau *w* jusqu'à une teneur en eau *ws* définie comme la limite de retrait. En dessous de cette limite *ws* le sol perd de l'eau sans grande variation de volume et il se désature. La limite de retrait et l'indice de retrait *Is= wL-ws* apparaissent donc comme des éléments fondamentaux pour l'étude des variations volumétriques des sols.

c- Classification à base de la surface spécifique

Les limites d'Atterberg qui peuvent être déterminées à l'aide d'un matériel léger dans les laboratoires de chantiers, présentent l'essai de référence pour les sols argileux mais ne donnent pas une identification précise de la nature minéralogique des particules argileuses et de leur influence sur le comportement global du sol. La détermination de la surface spécifique des particules d'un sol offre une meilleure caractérisation de l'argilosite, puisque cette surface varie de façon très importante avec la nature des particules.

On notera qu'il existe deux types de surfaces spécifiques :

- surface spécifique externe associée au niveau interparticulaire et vaut 80 m2/g pour une montmorillonite et 70 à 140 m2/g pour une illite ;
- surface spécifique interne, associée au niveau interfoliaire et atteint 800 m2/g pour une montmorillonite alors qu'elle est quasiment nulle pour l'illite.

Afin de calculer la surface spécifique d'un sol argileux, différentes techniques ont été présentées. La plus simple et la plus usitée est la technique de l'essai au bleu de méthylène puisque les molécules de la solution de cette solution adhèrent aussi bien à la surface interne qu'a la surface externe des argiles (*Djellali* ,2018).

I.8.Dommages et pathologie des ouvrages fondés sur sols gonflants

1.8.1. 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).

Bellatrache 2012 **,**il a relevé des désordres et des dégradations au niveau des constructions de l'hôpital d"Ain-Aéns causés par ce phénomène de retrait / gonflement (figure I.11). Les sols gonflants existent dans la région de Batna (N'gaous, Boumeguer)) des dommages considérables tels que les fissurations et le soulèvement de fond de fouilles comme montre la figure I.12 Benyahia, 2022.



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).



Figure I.11: Rupture et fissuration du mur de l‟hôpital d‟Ain-Aénas (Bellatrache 2012).



Figure I.12: Des cas pathologiques dans certain région de la Wilaya de Batna (Benyahia, 2022).

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.13), 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.14) 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.13 : Déformation d'une chaussé sur un sol support gonflant dans la ville de Tébessa (Djellali et al 2012).



Figure I.14 : Dommage de gonflement dans la région d'Oum-Elbouaghi (Bekhoche, 2018).

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 leurs comportement mécaniques et physiques par la suite réduire le nombre des dégâts.

Chapitre II

Techniques du traitement des sols

II.1 Introduction

Le traitement des sols s'inscrit 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. Plusieurs techniques du traitement des sols utilisé pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. 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. L'objectif principal de ce chapitre est de faire une synthèse bibliographique sur le traitement des sols instables par l'utilisation de différents techniques à savoir traitement chimique , mécanique et physiques .

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 médiocre. Elle doit permettre d'améliore la plasticité , la résistance à la compression simple, au cisaillement, la portance et par conséquence une diminution du tassement – gonflement .On distingue trois techniques du traitement des sols qui sont :

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

II.2 .1.Traitement mécanique

II.2 .1.1.Compactage

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à accroître la densité en place d'un sol. Cette action augmente la capacité du sol, resserre la texture du matériau réduit les possibilités de déformation du terrain et améliore sa capacité portante (Hafsi, 1998). Les ouvrages couramment concernés par le compactage sont les remblais routiers, les barrages en terre et les aérodromes.

a- Compactage de surface

Le compactage de surface est un procède de densification des sols en place (figure II.1). Ce

procède mené à une diminution des vides du sol par des moyens mécaniques aboutissant ainsi à une augmentation de la densité et de la résistance ainsi qu'une réduction de la compressibilité. L'application des charges sur le sol à compacter par le biais de certains rouleaux de compactage statiques ou vibratoires induisent une densification dans le sol qui sera proportionnelle à l'énergie mécanique appliquée. Le compactage de surface peut être accompli sur différents types de sites (Lawton, 2004).



Figure II.1 : Stabilisation par compactage de surface (Cas d'un projet de chemin de fer RTT, Wilaya de Tiaret, Algérie, ETRHB, 2017).

b- 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' améliorer en profondeur les caractéristiques mécaniques. Le pilonnage est associé à un contrôle géotechnique particulièrement 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.2). 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 (mesures de tassements, contrôles des caractéristiques mécaniques du sol par essais in situ…etc.) (Gadouri, 2017).



Figure II.2 : Compactage Dynamique.

II.2 .2. Traitement chimique

Le traitement chimique permet de rendre le sol insensible à l'eau d'une façon irréversible et de lui conférer des propriétés mécaniques convenables. Cette opération renchérit le coût de l'utilisation du sol. Le principe d'utilisation de la stabilisation chimique d'un sol expansif consiste à l'expansion du sol. Le squelette solide est maintenu, aux points de contacts entre les grains, par des liants appropriés. A échelle microscopique, c'est un renforcement des liaisons chimiques pouvant exister. Les techniques courantes de stabilisation d'un sol gonflant sont celles utilisant la chaux ou un ciment. L'adéquation et l'efficacité d'une quelconque stabilisation chimique peut être justifiée à l'échelle de l'expérimentation (Mouroux et al., 1988).

II.2.2.1 Traitement par la chaux

Le traitement par la chaux c' est la technique la plus répandue dans le domaine géotechnique De nombreuses études ont montré que le traitement des sols argileux par la chaux transforme ces derniers en sols fermes et améliore leur résistance, leur perméabilité et stabilise leurs volume après gonflement et retrait. L'incorporation de la chaux génère immédiatement la formation d'une masse granuleuse, et a pour effet de réduire le taux d'humidité. L'utilisation de cette technique permet :

- D'éviter des volumes de terrassement importants dans le cas de substitution des sols

médiocres.

- De donner aux sols argileux d'une manière assez rapide une bonne consistance pour des dosages compris entre 1% et 2%. Ceci montre aussi l'intérêt économique de ce procédé.
- De modifier les propriétés du sol.

Sachant qu'il y a deux types de chaux, vive et éteinte, le choix s'effectue en basant sur les essais de laboratoire, les essais de chantier et sur le prix de revient.

II.2.2.1.1 Mécanisme de traitement à la chaux

D'après Nelson et al. (1992), l'interaction entre le sol et la chaux dépend, entre autres, du pH du sol, de la quantité de carbone organique contenu dans le sol, des mouvements d'infiltration, et de la teneur du sol en calcaire, en gypse et en ammonium (NH^{4+}). Les types de réactions pouvant se produire sont : l'échange cationique, la floculation, la carbonatation et la réaction pouzzolanique.

a- Échange cationique

L'addition de la chaux à un sol argileux incite à des réactions chimiques parmi lesquelles les ions de calcium (Ca^{2+}) de la chaux tendent à remplacer les ions de sodium (Na^{+}) ou de potassium (K^{+}) existant dans le sol. Ce remplacement cationique résulte en une réduction de la valence des particules argileuses, et donc, du potentiel de gonflement de celui- ci

b- Floculation

L'ajout de chaux à des grains fins d'argiles cause une floculation et une agglomération des particules. Ce phénomène a comme résultat 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 des sols . (Ferrah 2006).

c- Carbonatation

Le contact de la chaux avec l'air peut permettre des réactions avec le dioxyde de carbone (CO_2). Les produits de réaction, tels que les carbonates de calcium ($CaCO_3$) et les magnésites ($MgCO_3$), sont reconnus par leurs pouvoirs de cimentation. La carbonatation de la chaux réduit, quelque peu, l'amplitude de réaction effective de la chaux avec le sol ou l'eau contenue dans le sol. C'est la raison pour laquelle la chaux devra être protégée de l'air libre avant d'être mise en œuvre dans le sol. De même, la mise en œuvre devra être dans un temps réduit (Zenkhri 2009).

d- Réaction pouzzolanique

La réaction dite pouzzolanique se produit entre la silice (SiO_2) et/ou l'alumine (Al_2O_3) du sol et la chaux pour former certains types d'agents de cimentation ou de solidification. 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.

II.2.2.1.2 Effets de l'ajout de chaux sur les propriétés géotechniques des 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 teneurs 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 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 %.

Benyahia **,** **(**2022)explique l'effet d'un traitement par la chaux d'un sol argileux de la région de Batna (N'gaous) **,** afin de déterminer l'influence de l'ajout de chaux sur le potentille de gonflement .Les résultats montrent que l'argile non traitée est classé comme sol fortement gonflant avec une pression de gonflement de 2,58 bars., lorsque le dosage de chaux est faible (3 %), la pression réduit à 1,73 bar. Lorsqu'on utilise des doses plus élevées, 5 %, 7 % et 9 %, une réduction de la pression de gonflement a été observée, et l'argile a montré des valeurs de 1,08, 0,67 et 0,47 bar, respectivement. Donc l'augmentation de teneur de chaux diminue considérablement le gonflement de l' argile . Il a 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.2.2.2 Traitement par le ciment

Selon La Rousse (Larousse., 2017), un ciment est « une matière pulvérulente formant avec l'eau, ou une solution saline, une pâte plastique liante, susceptible d'agglomérer, en durcissant, des substances variées ». Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire que mélangé à l'eau il forme une pâte qui fait prise et durcit (propriétés hydrauliques). Il est utilisé sous forme de poudre pour confectionner du béton ou du mortier. Les ciments courants sont élaborés à partir d'un mélange d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile, mélange qui est progressivement chauffé à une température voisine de 1450°C, puis brusquement refroidi. Au cours de ces

opérations, s'enchaînent plusieurs réactions chimiques. Il en résulte le clinker qui, mélangé avec du gypse et éventuellement avec d'autres produits, puis finement broyé, donne le ciment.

II.2.2.1 Effet de l'ajout 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.

Bekhouche , (2018) d'étudier l'effet de l'ajout de ciment sur l'amélioration des caractéristiques géotechniques des cinq sols ensuite leur stabilisation vis-à-vis du gonflement. Cette étude a montré que la limite de plasticité et la limite de retrait ont été augmentées avec l'augmentation des teneurs en ciment. Par contre, la limite de liquidité et l'indice de plasticité diminuent. Le potentiel de gonflement ainsi que la pression du gonflement ont été diminué après l'ajout du ciment, cependant un traitement de ciment à 9% réduit le potentiel de

gonflement de 75 à 91% pour les sols testés, ce qui correspond à une réduction dla pression de gonflement de 70 à 81%.

II.2.3 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 à 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 à lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines.

II.2.3.1 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 sols 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

constatés 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.

Khettaoui, (2021) a noté une augmentation de la résistance au cisaillement ainsi la réduction des cohésions et l'augmentation des angles de frottements avec l'augmentation de la proportion du sable dans l'argile plastique ce qui permis le passage d'un état cohérent vers un état granulaire, et par la suite une augmentation de la résistance.

Goufi et al, (2022) ont étudié l'influence de sable de dune sur les caractéristiques géotechniques 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 constaté que l'ajout de sable produit une diminution de l'indice de plasticité et la teneur en eau, et augmentation de la densité sèche ce changement de comportement dû à le remplacement 'une partie faible densité de l'argile par des particules de sable de dune dans les mélanges. Ainsi, ils ont observé que l'addition de sable à une argile augmente la résistance à la compression pour des pourcentages allant 10% et 20 %

.Eisa et al, (2022) ont indiqué que le traitement d'un sol argileux par différents pourcentages de sable provoque une diminution de potentiel 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.

Selon Egu et al , (2024) Les résultats de laboratoire montrent que l'addition de sable au sol réduit le gonflement libre et le potentiel de gonflement. Cela montre que les propriétés du sol gonflant diminuent avec l'ajout de sable et diminuent ses propriétés de retrait. Par conséquent, la résistance de ce sol augmente avec l'ajout de sable .

II.3. Technique de renforcement des sols par fibres

Le renforcement des sols par fibres est une technique moderne qui consiste incorporer des fibres au sein du sol pour but de renforcement et la stabilisation de ce dernier, L'utilisation des fibres dans le génie civil s'est développée rapidement ces dernières années. Dans de nombreuses

applications, les fibres offrent des facteurs de sécurité améliorés et des coûts réduits par rapport aux matériaux traditionnels. Dans le domaine géotechnique l'utilisation des fibres est une technique moderne qui consiste incorporer des fibres au sein du sol pour but de renforcement et la stabilisation de ce dernier, Pour le cas des fibres synthétiques, elles sont utilisées généralement pour améliore la résistance à la compression simple et au cisaillement.

II.3.1. Les fibres

Les fibres sont l'une des formes les plus extraordinaires de la matière. Elles sont souvent beaucoup plus résistantes et plus rigides que le même matériau sous forme massive. Elles ont des propriétés spécifiques remarquables, par exemple pour une résistance mécanique donnée, un fil d'acier sera trois ou quatre fois plus lourd que la plupart des fibres depolymère. La finesse des fibres leur permet d'être tissées et drapées dans des formes complexes (Rokbi.2001).

II.3.2. Classification des fibres

Plusieurs types de fibres sont généralement utilisés en géotechnique, elles peuvent être classées en deux catégories :

- Fibres naturelles ;
- Fibres synthétiques.

II.3.2.1. Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont classées généralement en fonction de leurs origines : Animale, végétale. 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 ; grnes, 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.3), 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. Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre sa densité et son teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Et elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, son élongation à la rupture et son module d'élasticité



Figure II.3 Fibres de chanvre

II.3.2.2. Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenus à partir de substances fournis par l'industrie pétrochimique. Elles ont fait leurs apparitions au début de 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 Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées sont :

-Les polyamides (Nylons) ;

-Les polyesters ;

-Les dérivés polyvinyliques ;

-Les polyoléfines ;

-Les polypropylène .

II.3.2.3. Fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile. Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines des produits chimiques (figure II.4). 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 (Londonderry House Hôtel), ainsi que l'élaboration de panneaux décoratifs de 33cm d'épaisseur et aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux. Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60 mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment. Leur module d'élasticité plus faible que la pâte durcie. Il convient de les utiliser de préférence pour les pièces minces devant résister, soit à l'action corrosive de certaines ambiances dans lesquelles l'acier pourrait se corroder rapidement, soit aux chocs mécaniques (Dani et all 2016).



Figure II.4 : Fibre de polypropylène

II.3.3. Effet des fibres de polypropylène sur les caractéristiques géotechniques des sols argileux

Plusieurs chercheurs ont montré que le traitement par fibres est d'une technique 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.

L'étude effectuée par Mahdi (2019) avait mis en évidence l'efficacité de l'utilisation des fibres pour le renforcement d'un sol argileux de M'Sila (Chaaba el Hamra) argileux. Les fibres ont été incorporées dans le sol en différents pourcentages : 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 et 1% par rapport à la masse sèche du sol de M'Sila (Chaaba el Hamra), Algérie, est renforcé par des fibres de polypropylène. Les fibres ont été incorporées dans le sol en différents pourcentages: 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 et 1% par rapport à la masse sèche du sol. Le programme expérimental entrepris consiste à étudier l'effet de l'ajout de ces fibres sur les caractéristiques géotechniques du sol .Les résultats obtenus que l'ajout des fibres de polypropylène améliore le comportement du sol vis à vis du poinçonnement immédiat du sol. Le renforcement du sol par les fibres de polypropylène améliore la résistance en compression par 220%.

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°.

Selon Chaa. (2019**)** L'utilisation des fibres de polypropylène contribue également à l'amélioration de la résistance. Il a été constaté que la résistance en compression à 28 jours varie de 356 à 469 kPa lorsque l'argile est renforcée par les fibres seules avec un dosage de 1,2%, ce qui représente une nette amélioration de l'ordre de 32%. Ce comportement peut être expliqué par le fait que les fibres de polypropylène supportent une partie du chargement appliqué et jouant ainsi le rôle des renforts dans le sol.

II.4 .Conclusion

Le traitement des sols a été étudiée par un grand nombre des auteurs . Beaucoup de méthodes ont été mis au point, pour connaître l'effet de l'ajout sur l'amélioration de

comportement des sols argileux.

Le choix de technique 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.

A travers cette recherche bibliographique, nous avons montré que plusieurs travaux confirment que l'emploi de sable comme stabilisants des sols plastique 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 au sable de dune . C'est cette thématique que nous traitons dans ce travail de mémoire.

Chapitre III

Matériaux et méthodes expérimentaux

III.1 Introduction

Ce chapitre présente la caractérisation de base des matériaux utilisés et des expériences réalisées au cours de l'étude. Plusieurs matériaux de natures différentes ont été utilisés dans cette étude. Le sol utilisé comme un sol de référence est une argile plastique provenant du site de Haouch Bayazid dans la wilaya de Médéa, faisant partie du projet unité républicaine de sécurité (U.R.S). Deux matériaux ont été utilisés pour le traitement le sable de dune de Hassi Bahbah de Djelfa et les fibres de polypropylène (PP). Le programme expérimental est réalisé sur l'échantillon effectué au sein de laboratoire E.P.E société d'études techniques et d'architectures (SETAM) de Médéa et laboratoire l'université de Médéa.

III.2 Situation géographique de la région d'étude

La wilaya de Médéa est située au Nord de l'Algérie, Le Chef-lieu de la wilaya est à 88 km de la capitale, Alger. Cette région est caractérisée par une topographie irrégulière et une hétérogénéité marquée des formation géologiques. Notre site est situé dans la wilaya de Médéa (Haouch Bayazid) les coordonnées géographiques du site sont approximativement : 36.266700° N de l'altitude et 2.750000° E de longitude.

III.2 Matériaux utilisés

III.2.1 .Argile

Le matériau argileux qui font l'objet de cette étude a été prélevée à Haouch Bayazid wilaya de Médéa (figures III.1) dans le cadre de réalisation d'un projet unité républicaine de sécurité (U.R.S).. Le matériau remanié a été excavé, rempli dans des sacs en plastique et transporté au laboratoire E.P.E société d'études techniques et d'architectures de Médéa (SETAM) pour préparation et exécution des essais d'identification et de caractérisation.

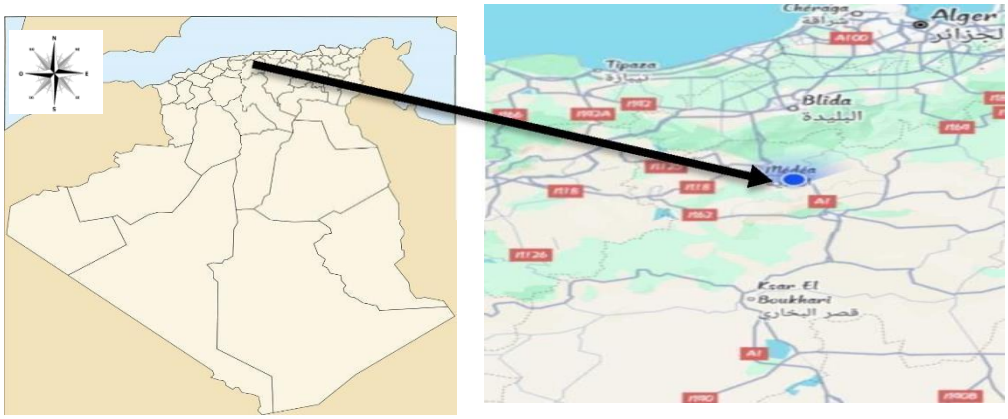




Figure III.1 : Localisation du site étudié.

III.2.2. Sable

Le sable employé dans cette étude est un sable de dune (figure III.2) , provenait de la ville de Hassi Bahbah dans la wilaya de Djelfa . Il est principalement composé de silice et se distingue par sa propreté .Ce types de sable est souvent utilisé dans la construction des bâtiments, et ouvrage d'art .



Figure III.2 : Sable de dune.

III.2.3. Fibres

Dans cette étude nous avons utilisé les fibres de polypropylène , un matériau synthétique à base de polymère (PP) (figure III.3) 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.1 : 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 Densité spécifique Pays d'origine	Stable 0,91 g/cm Fabriqué en Turquie



Figure III.3 : Les fibres de polypropylène**.**

III.3. Méthodes expérimentales

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

Tableau III.2 : Les différents essais effectués.

Essais		Norme
Essais chimiques	Analyse chimique PH mètre Valeur de bleu méthylène	NF P 18 660-1 NF P 94-068
Essais physiques	Densité humide	NF P94-053
	Teneur en eau	NF P 94-050
	Analyse granulométriques par tamisage et sédimentométrie	NF P 94-056 . NF P 94-057
	Essai des limites de consistances	NF P 94-051
	Equivalent de sable	NF P 18-598
Essais mécaniques	Essai de Proctor normale	NF P 94-093
	Essai de cisaillement la boite	NF P 94-071-1
	Essai œdométrique	NF P 94-090-1

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 et de caractérisation voir figure au-dessous.



Figure III.4 : Préparation d'échantillon.

III.5 .Caractéristiques géotechniques des sols étudiés

III.5 .1 Argile

III.5.1.1 Caractéristiques chimiques

III.5.1.1.1. 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 de société d'études techniques et d'Architecture de Médéa SETAM **(**figure III.5). Les résultats sont résumés dans le tableau III.3 .

Tableau III.3 : Résultats de l'analyse chimique.

Constituants	Carbonates ($CaCO_3$)	Sulfates (SO_4^{--})	Matière organique
Valeurs	32.38%	0 (Mg/Kg)	4.22%

D'après les résultats d'analyse chimique, on voit que notre matériau présente un pourcentage de 32.38% carbonates, selon la norme NF P 94-048, comme indique le tableau III. 4, le matériau étudiée a été moyennement calcaire. L'analyse chimique montre aussi que le matériau étudié ne présente pas de concentrations en sulfates, ce qui nous permis de la classer comme non agressive.

Tableau III.4 : Classification des sols en fonction du pourcentage de carbonates

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.5 : Analyse chimique.

III.5.1.1.2 Mesure de PH

Cette mesure a été déterminée à l'aide d'un pH-mètre sur une suspension de 10 grammes de matériau sec dans 25 millilitres d'eau déminéralisée. L'analyse de notre sol a montré que son pH est 7.4.



Figure III.6 : PH mètre .

III.5.1.1.3 Essai au bleu de méthylène [NF P 94-068]

L'essai au bleu de méthylène, est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la capacité des éléments fins du sol à adsorber du bleu de méthylène, cette capacité d'adsorption rend

compte globalement de l'activité de surface des argiles . 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) la valeur de bleu méthylène , exprimée en grammes de bleu pour 100 g de fines qui est donnée par la formule :

VBS = V/M

V : Volume du bleu méthylène injecté ;

M : Masse de l'échantillon.



Figure III.7 : Essai au 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 (m^2/g)

Les résultats obtenus de notre matériau sont récapitulés dans le tableau III.5 :

Tableau III.5: Résultat de la valeur du bleu de méthylène.

Échantillon	**Le volume Injecté (ml)**	**VB (ml/g)**	**SST (m^2/g)**
Argile	360	6	126

D'après le résultat obtenu et selon le Guide des Terrassements Routiers (GTR 92) notre argile moyenne d'activité de la fraction argileuse (le tableau ci-dessous).

Tableau III.6 : Qualificatif l'activité de la fraction argileuse selon le coefficient VBS (GTR92).

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.5.1.2 Caractéristiques physiques

III.5.1.2.1 Teneur en eau naturelle [NF P 94-050]

L'essai de teneur en eau est une procédure fondamentale en géotechnique permettant de déterminer la quantité d'eau présente dans un sol . Cette teneur , exprimée en pourcentage , correspond au rapport entre la masse d'eau contenue dans l'échantillon et sa masse sèche . l'essai consiste à la passer un échantillon de sol humide , puis à le sécher au four à une température comprise entre 105°C et 110°C pendant 24 heures (figure III.8 **)** , afin d'éliminer toute l'humidité .On le pèse de nouveau pour déterminer la masse sèche . La différence entre les deux masses permet de calculer la teneur en eau . Dans notre cas la teneur en eau contenue dans de l'argile testé est 21.13%.



Figure III.8 : Préparation de l'essai de teneur en eau.

III.5.1.2.2 Densité humide [NF P 94-053]

L'essai de densité humide est une méthode utilisée en géotechnique pour déterminer la masse volumique d'un sol en place, incluant l'eau qu'il contient. Il permet de connaître la densité apparente ou densité humide (ρ), exprimée généralement en g/cm³ ou kg/m³. Cet essai est essentiel pour évaluer la compacité d'un sol et intervient notamment dans le contrôle de la mise en œuvre des remblais ou des couches de chaussée. La méthode la plus courante consiste à utiliser un appareil à sable ou un densitomètre nucléaire, permettant de mesurer le volume de la cavité creusée et la masse de sol extraite. En complément, la teneur en eau du sol est mesurée en laboratoire afin de pouvoir calculer la densité sèche, paramètre fondamental pour le suivi des travaux de compactage. La densité de l'argile étudié est 1,58 kg/m³.



Figure III.9 : Essai de la densité humide **.**

III.5.1.2.3 Analyse Granulométrique

Analyse Granulométrique par Tamisage [NF P 94-057]

L'essai consiste à séparer par brassage sous l'eau, les grains agglomérés puis une fois séchée, à classer au moyen d'une série de tamis, emboités les uns dans les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieur des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis (figure III.11) La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse. Le tamisage est pratique pour des grains de diamètre supérieur à 80 µm). Les résultats de l'analyse sont traduits sous forme d'une courbe semi logarithmique, présentée sur la figure III.10 .



Figure III.10 : L'essai de l'analyse Granulométrique par Tamisage

-Analyse granulométrique par sédimentométrie [NF P 94-057]

La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage des sols. Elle s'applique aux éléments de diamètre inférieur à 80 µm et La sédimentométrie consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau (figure III.11). 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 dé floculant pour imbiber puis disperser l'échantillon. Ce mélange est constitué à partir de 440cm³d'eau distillée et de 60cm³d'une solution à 5% d'hexa métaphosphate de sodium, 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

ambiante. 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.12.



Figure III.11 : Essai de l'analyse granulométrique par sédimentométrie.



Figure III.12 : Courbe d'analyse granulométrique de l'argile étudie

L'analyse granulométrique de l'échantillon étudié montre que le sol est très fins, car le pourcentage des éléments fins (<80µm) présentent plus de 90% avec un coefficient d'uniformité de 4 et coefficient de courbure de 0, 25

III.5.1.2.4 Limites de consistances [NF P 94-051]

Les limites d' Atterberg sont des indices fondamentaux utilisé pour caractériser la consistance des sols fines en fonction de leur teneur en eau . Elle permettent de définir les états physiques successifs que peut adopter un sol argileux : solide , plastique et liquide.

1- Limite de liquidité

La limite de liquidité représente la teneur en d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquidité (le sol est humide et déformable) et un état plastique. Cette mesure permet d'évaluer la sensibilité du sol à l'eau et son comportement en présence d'humidité élevée . Une valeur élevée de la limite de liquidité indique une forte teneur en argile et une plasticité marquée. La détermination de limite de liquidité est faite sur la fraction du matériau passant au tamis de 0,4 mm. La limite de liquidité est la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée sur une pâte placée dans une coupelle se referme sur un centimètre au bout de 25 chocs (figure III.14).



Figure III.13 : Détermination de limite de liquidité.

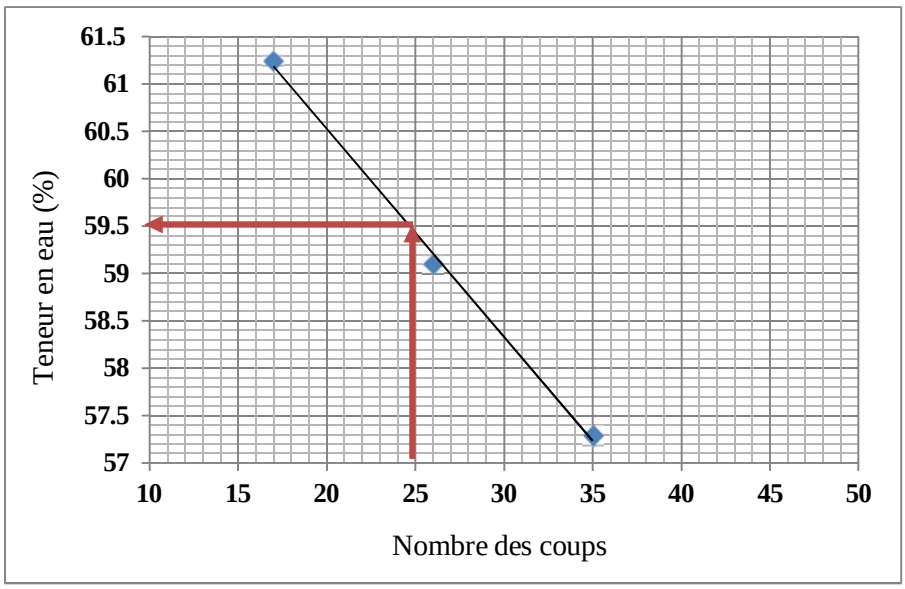


Figure III.14 : Courbe de limite de liquidité.

2- Limite de plasticité

La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm (figure III.16). Une fois les fissures apparues, on prélève la partie centrale du rouleau.



Figure III.15: Détermination de limite de plasticité.

3- L'indice de plasticité

L'indice de plasticité est un paramètre qui mesure l'étendue du domaine de plasticité d'un sol . il est calculé par la différence entre la limite de liquidité (WL) et la limite de plasticité (WP) , selon la formule suivante

IP = WL – WP

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.7-ci-dessous résume les limites trouvées pour l'argile étudié.

Tableau III.7 : Résultat des limites de consistances

Les limites d'Atterberg	Limite de liquidité	Limite de plasticité	Indice de plasticité	Indice de consistance
Résultants (%)	59.2	26.61	32.59	1.32

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 .



Figure III.16: Position de l'argile dans le diagramme de Casagrande

D'après L'abaque de Casagrande. 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.8) l'argile étudiée est une argile très plastique ,ceci traduit une grande sensibilité à l'eau.

Tableau III.8: Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité (SETRA-LCPC 1992).

Indice de plasticité	Caractéristique
Ip ≤ 12	Faiblement plastique
12 < Ip ≤25	Moyennement plastique
25 < Ip ≤40	**très plastique**
40 < Ip	Très plastique à extrêmement plastique

III.5.1.3. Caractéristiques mécaniques

III.5.1.3.1 Essai de Proctor normale [NF P 94-093]

L'essai Proctor normal est un essai de laboratoire fondamental en géotechnique, qui permet de déterminer la teneur en eau optimale d'un sol pour atteindre sa densité sèche maximale lors de la compaction. 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 conventionnels Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche de matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. On trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.



Figure III.17: Réalisation de l'essai Proctor normale

Les caractéristiques obtenues par l' essai Proctor révèlent que l'argile étudié présente une densité séché maximale de 1,47 t/m³, et la teneur en eau optimale égale à 25,21%.

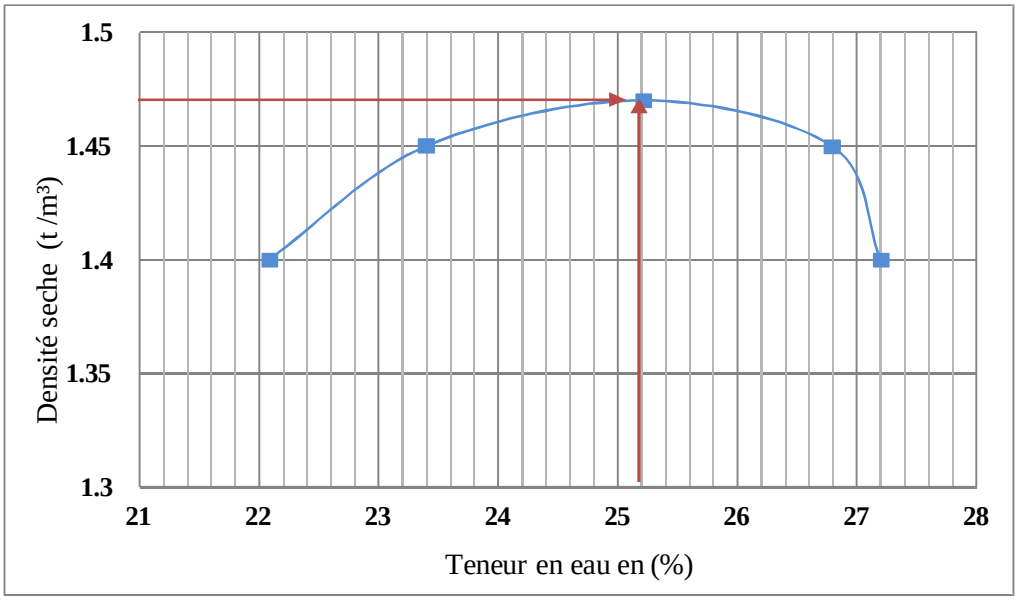


Figure III.18 : Courbe Proctor normal .

Tableau III.9 : résultat d'essai Proctor .

	Densité sèche	**Teneur en eau optimal**
Résultat	**1,47 t/m³,**	**25,21%.**

III.5.3.2 Essai de cisaillement à la boite de Casagrande [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 de cisaillement direct (figure III.19) réalisé sur trois éprouvettes au minimum de mêmes dimensions, préparées dans les mêmes conditions, cisaillées à la même vitesse mais soumises à des efforts verticaux différents (1 bar, 2bar, 3bar) permet de déterminer des cohésions et des angles de frottement internes à. L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boite de cisaillement constituée de deux demi- boites indépendantes. Le plan de séparation des deux demi - boites constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. Sur la surface de rupture, la résistance au cisaillement (τ) est en fonction de la contrainte normale (σ) appliquée, du frottement interne (φ) du matériau et de sa cohésion (c) « loi de coulomb ». 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 . 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. Le résultat obtenu de l'essai de cisaillement rectiligne à la boite du matériau argileux est présenté sur les figures III.21- 22 D'après ce résultat ont noté que l'argile étudié présente une cohésion de 45kPa, et l'angle de frottement égale à 8°.



Figure III.19: Essai de cisaillement rectiligne à la boite.

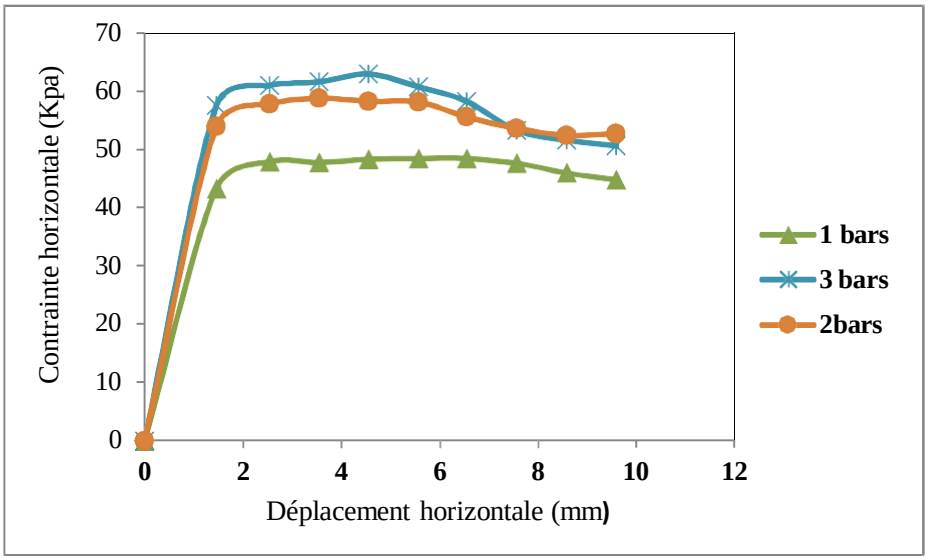


Figure III.20 : Contraintes de cisaillement en fonction de déplacement horizontal .

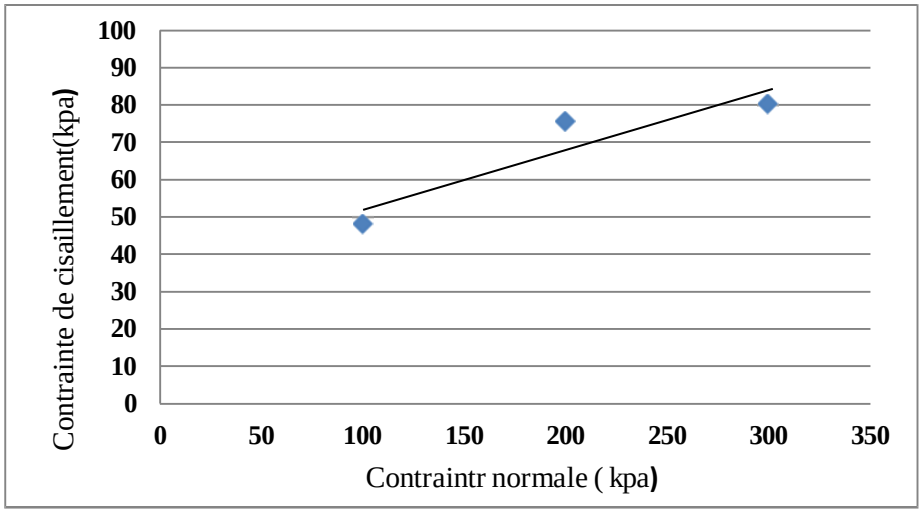


Figure III .21: Courbe contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale.

III.5.1.3.3 essai Œdométrique [NF P 94-090-1]

Cet essai a pour objet l'étude de la consolidation d'un échantillon de sol intact ou remanié, soumis à une charge vertical constante par paliers, drainé verticalement et entouré latéralement d'une enceinte rigide. essai oedométrique permet de mesurer la variation de hauteur de l'échantillon sous différentes charges appliquées partir des résultats de cet essai on procède à l'évaluation de l'amplitude du tassement de consolidation primaire d'une couche de sol compressible ainsi que le temps de consolidation qu'elle nécessite, L'essai oedométrique 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 . 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 l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant (figure III.22) l'essai la charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissant et décroissants suivant un programme défini,. La courbe oedométrique de l'argile étudié est donnée sur (la figure III.23) D'après cette figure on remarque que l'argile étudiée présente une valeur de l'indice de compressibilité de 15.65% et une valeur de coefficient de gonflement de 3.51%



Figure III.22 : Cellule Oedometrique et appareil oedometrique.

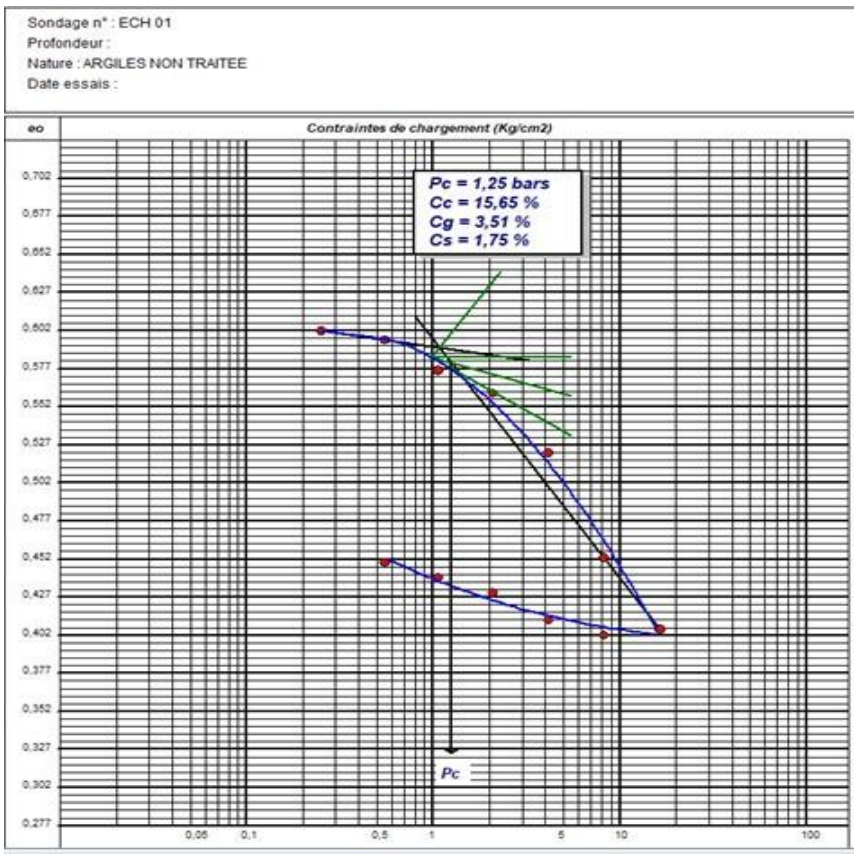


Figure III.23 : Courbe oedométrique.

III.5 .2. Sable

III.5.2.1. Caractéristiques Chimiques

III.5.2.1.1 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 de société d'études techniques et d'Architecture de Médéa SETAM (Figure III.4). Les résultats sont résumés dans le tableau III.10. La faible teneur en carbonates et en sulfates donne la bonne qualité chimique du sable de dune .

Tableau III.10 : Résultats de l'analyse chimique.

Constituants	Carbonates (CaCO3)	Sulfates (SO_4^-)
Valeurs	2%	0 (Mg/Kg)

III. 5.2.1.2 Mesure de PH

Le ph mesuré pour l'échantillon de sable de dune est de **7,8** , ce qui indique le sol est légèrement alcalin. Cette valeur montre que le sable a un environnement chimique neutre à faiblement basique ,

III. 5.2.1.3 Essai au bleu de méthylène [NF P 94-068]

L'essai au bleu de méthylène effectué sur le sable de dune a donné une valeur de VB= 0,25 ml .Cette valeur très faible traduit une quasi-absence de particules argileuses ou de fines actives dans le sable .

Tableau III.11 : résultat de l'Essai de bleu méthylène.

Echantillon	**volume injecté (ml)**	**VB(ml/g)**	**SST(m^2/g)**
Sable	15	0.25	5.25

III.5.2.2. Caractéristiques physiques

Densité des grains solides [NF P 94054]

La densité de sable de dune est de 2.6 kg/m^3

III.5.2.2.1 Equivalent de sable [NF P 18-598]

L'équivalent de sable est réalisé pour déterminer la propreté et la qualité d'un sable .Il mesure la proportion de fines argileuses ou limoneuses présentes dans le sable , . L'essai consiste à prélever une fraction de sol (120 g) constituée de particules inférieures à 5 mm, et à l'introduire dans une solution lavant contenant un floculant (chlorure de calcium cristallisé + glycérine + formaldéhyde) destiné à disperser les particules. On agite fermement le produit obtenu, on laisse reposer ensuite l'ensemble (20mn). On constate, au fond de l'éprouvette, un dépôt solide, et au- dessus un floculant qui permet de caractériser la propreté des sables et le type de sol analysé. Les résultats de l'essai d'équivalent de sable donnent un **ESP** égale à **90 % > 80 %,** ce résultat classe notre sable de dune dans la catégorie du sable très propre. Un ES de 90% confirme que ce sable est adapté aux travaux de construction , notamment pour les bétons et les remblais, ou la qualité du granulat est primordiale .



Figure III.24 : Essai de l' équivalent sable .

Tableau III.12 : Classification des sols en fonction de l'équivalent de sable**.**

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	**Sable argileux** : risque de retrait ou de gonflement .sable à rejeter pour des béton de qualité .
65% < ES < 75%	60% < ES < 70%	**Sable légèrement argileux** de oropreté admosible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton .
75% < ES < 85%	70% < ES < 80%	**Sable propre** ç faible proportion de fines ardileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES > 85%	**ES > 80%**	**Sable très propre l'absence presque tatale de fines argileuses risque d'entrainer un d éfaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau .**

III.6. Conclusion

Ce chapitre a été dédié à l'identification des matériaux étudiés, dans le but de mieux comprendre leurs caractéristiques physiques et chimiques. En se basant sur les résultats de caractérisation obtenus lors des diverses analyses, il ressort que le sol analysé est une argile à plasticité élevée. Cette nature rend son utilisation en tant que sol support problématique, tant lors de la mise en œuvre qu'à long terme, pendant la durée de vie de l'ouvrage. C'est pourquoi nous nous intéressons à l'amélioration de ses propriétés mécaniques. Dans le chapitre suivant, nous examinerons l'impact de l'ajout de fibres de polypropylène, à différentes proportions, sur le comportement mécanique de cette argile traitée à Le sable . Cette analyse sera réalisée en se basant sur des paramètres tels que la compaction selon le Proctor, la résistance au cisaillement et œdométrique

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1 Introduction

Les résultats obtenus dans le chapitre précédent montrent que l'argile étudié présente un indice de plasticité important 28,72 %, 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 .A cet effet on a tracé un protocole expérimental se basant sur les essais géotechniques standards et des techniques du traitement utilisées principalement dans la recherche afin d'améliore le comportement de l'argile étudié. Dans la première partie de ce chapitre, on présente les principaux résultats obtenus aux effets de l'ajout de sable de dune à un sol argileux sur les proprietes géotechnique. La deuxième partie sera consacrée aux résultats de l'étude de renforcement par les fibres de polypropylène d'une argile traitée par le sable de dune.

IV.2. Préparation des mélanges

Dans un premier temps, le matériau est placé dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures afin d'éliminer toute l'humidité. Une fois séché, il est broyé puis tamisé pour obtenir une granulométrie homogène. La phase suivante consiste à incorporer des quantités de sable de dune en proportions définies (0 % , 15% , 30%) , et des fibres de polypropylène (1 % , 2%) (figure IV.1) . Le mélange est alors transféré dans un bac pour être malaxé manuellement. L'ajout de l'eau s'effectue progressivement, de manière à assurer une répartition uniforme et à atteindre la consistance souhaitée. Enfin, 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.



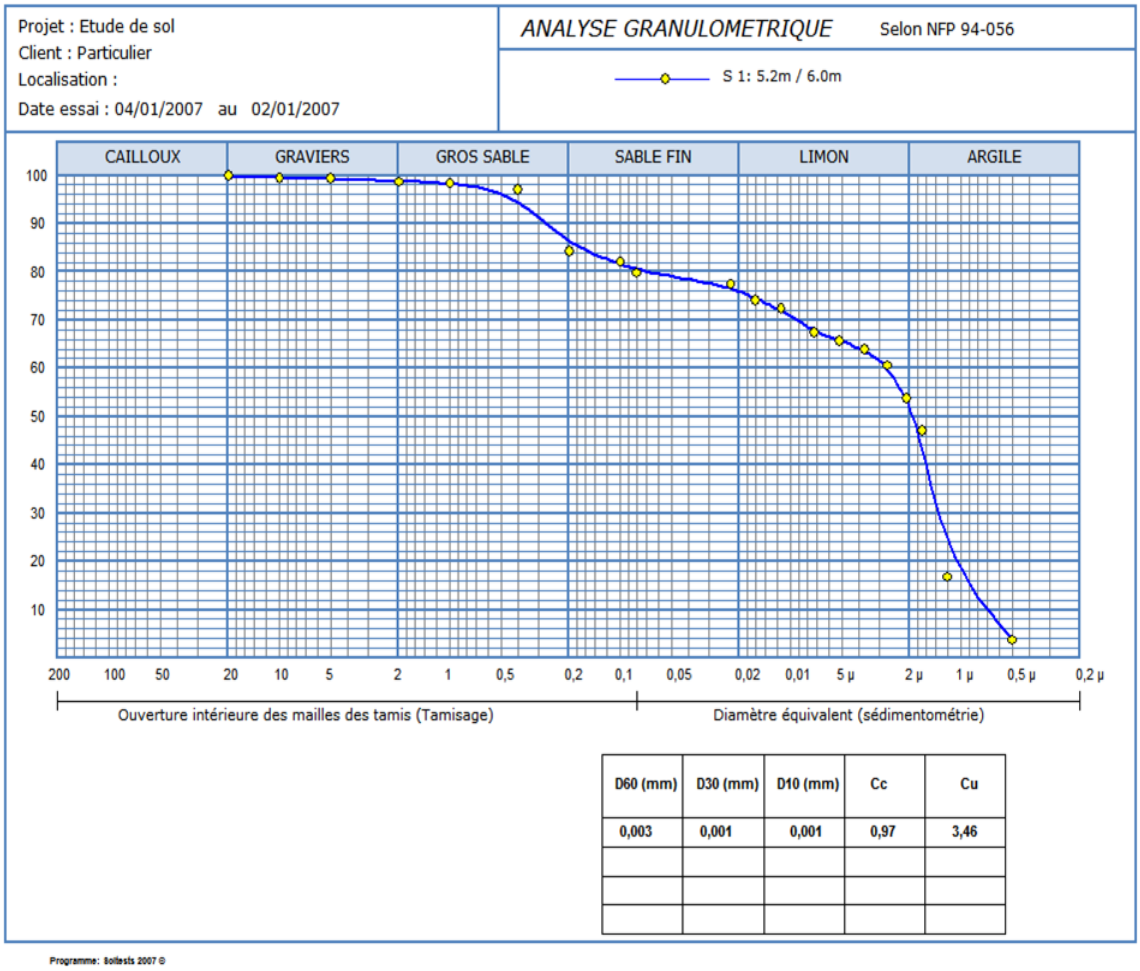
Figure IV.1 : Préparation des mélanges.

IV.3. Résultats et discussion

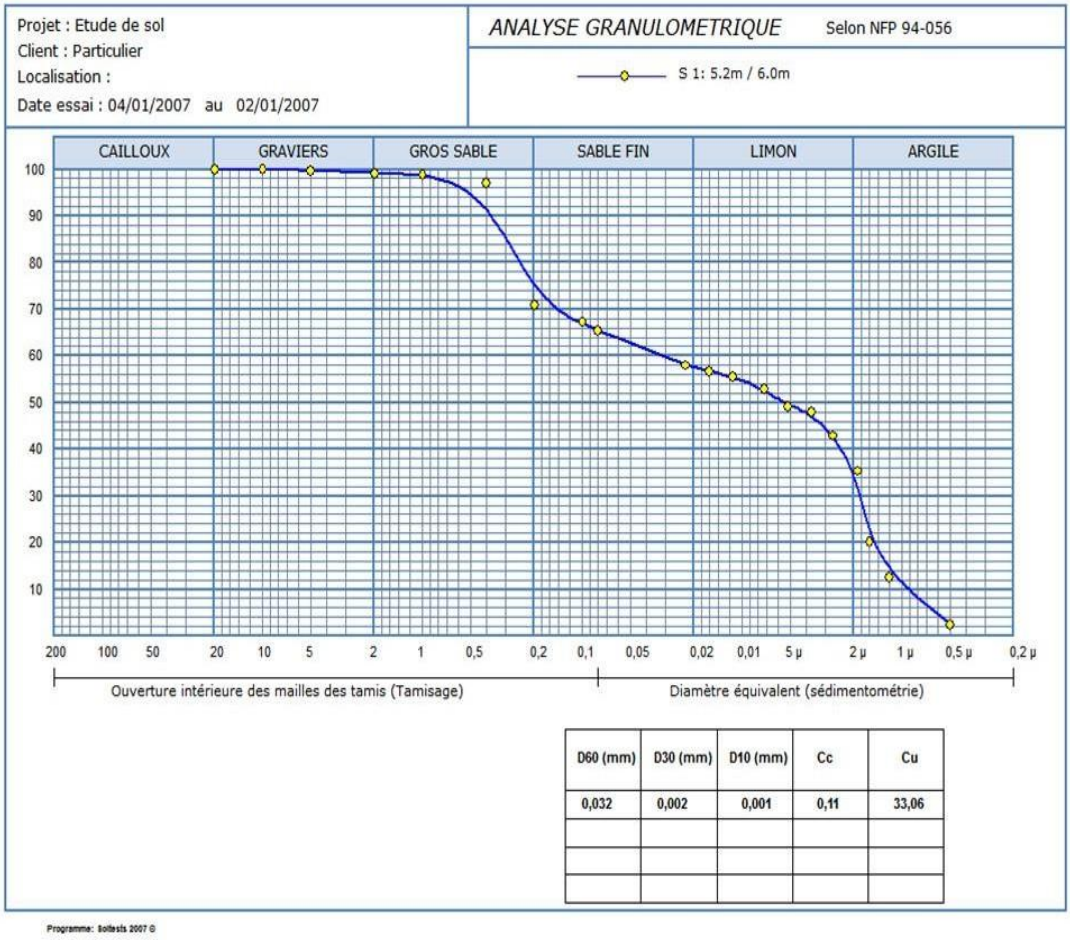
IV.3.1. Effet de l'ajout de sable de dune sur les paramétrés géotechnique d'une argile

IV.3.1.1.Effet de l'ajout de sable sur la granulométrie

La figure IV.2. représente les courbes granulométriques des différents mélanges argile +sable de dune (15 % 30%). A partir de ces courbes , on peut constater que l'ajout de ce dernier diminuer le taux des particules fines dans les sols traités, L'incorporation de fractions sableuses à hauteur de 15 % et 30 % dans une matrice argileuse induit une reconfiguration notable de la courbe granulométrique du matériau composite. Cette modification se traduit par un déplacement de la distribution granulométrique vers des diamètres plus élevés, engendrant un enrichissement en particules grossières et une réduction proportionnelle de la fraction fine (argiles et limons).



A) Analyses granulométrie (argile +15 % sable)



b-Analyse granulométrie (argile + 15 % sable) :

La figure IV.2 : Courbe d'analyse granulométrique des mélanges (argile +sable de dune)**.**

IV.3.1.2. Effet de l'ajout de sable de dune sur les limites de consistances

Afin d'étudier l'influence de l'ajout de sable de dune sur les limites de consistances , nous avons mélangées l'argile avec du sable de différentes (0 % , 15% , 30 %). Les essais des limites de consistance sont effectués selon les mêmes normes que celle présentées dans le chapitre III . Le tableau V.1 résume les résultats des limites de consistances pour les différents mélanges argile-sable.

Tableau IV.1 : Limites de consistances des différents mélanges (argile +sable de dune).

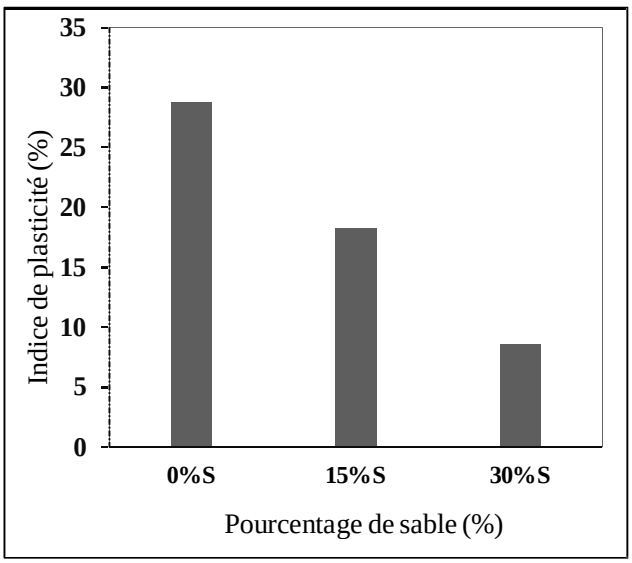
Mélange	WL (%)	WP	IP(%)	Ic(%)
Argile +0% Sable	59,2	30,48	28,72	1,32
Argile +15% Sable	44,85	26,61	18,24	1,30
Argile +30% Sable	30,35	21,75	8,6	1,07

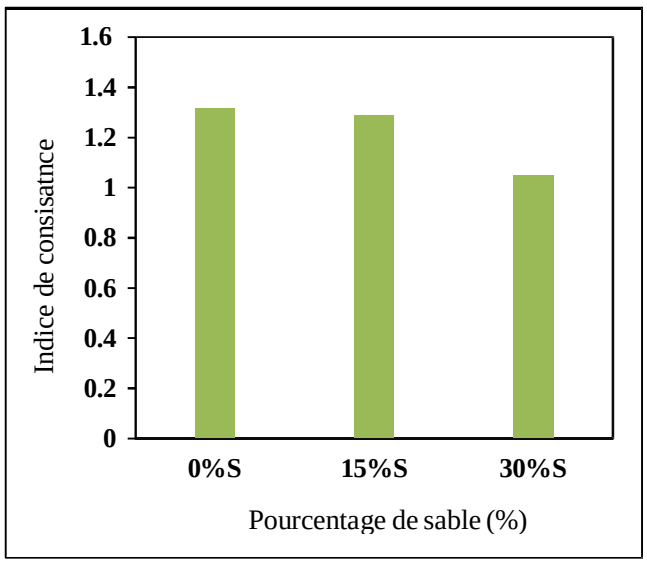
WL : Limite de liquidité ; **Wp** :Limite de plasticité ; **IP** : Indice de plasticité ; **Ic** : Indice de consistance .

La figure IV.3 illustre la variation des limites de consistance en fonction du pourcentage de sable additionné. D'après les résultats obtenus, on peut tirer les constatations suivantes :

- L'ajout de sable de dune dans un sol argileux produit une diminution de la limite de liquidité (*WL*), estimée à environ 48%. Cette diminution est attribuée à une réduction des particules fines actives, responsables de la plasticité du sol, ainsi qu'à une moindre capacité du matériau à retenir l'eau ;
- Pour la limite de plasticité, une diminution considérable, allant jusqu'à 29% environ, pour un pourcentage de sable de dune 30% ;
- L'incorporation de 30 % de sable de dune dans un sol argileuse entraîne une réduction remarquable de l'indice de plasticité, On passe d'un indice de plasticité de 28,72 % avec 0 % de sable de dune à 8,6 % avec 30% de sable de dune .Cette diminution reflète une amélioration de plasticité de l'argile étudié et devient moins plastique et donc plus facile à manipuler.
- On observe aussi une réduction de l'indice de consistance avec l'augmentation de la teneur en sable : il passe de 1,32 % pour l'argile non traitée à environ 1,05 % lorsque la proportion de sable de dune atteint 30 %.

A partir de ces résultats, on peut dire que le sable de dune produit une amélioration des limites de consistances. Cette amélioration due à la diminution de la cohésion du mélange argile-sable et la diminution de la surface spécifique totale puisque le pourcentage de la fraction argileuse est faible dans les mélanges . Des résultats similaires ont été rapportés par plusieurs auteurs Il en ressort que l'ajout de sable contribue à une amélioration de limite de consistances des sols. argileux (Bengraa 2004 ; Kollaros and Athanasopoulou 2016 ; Goufi 2022)





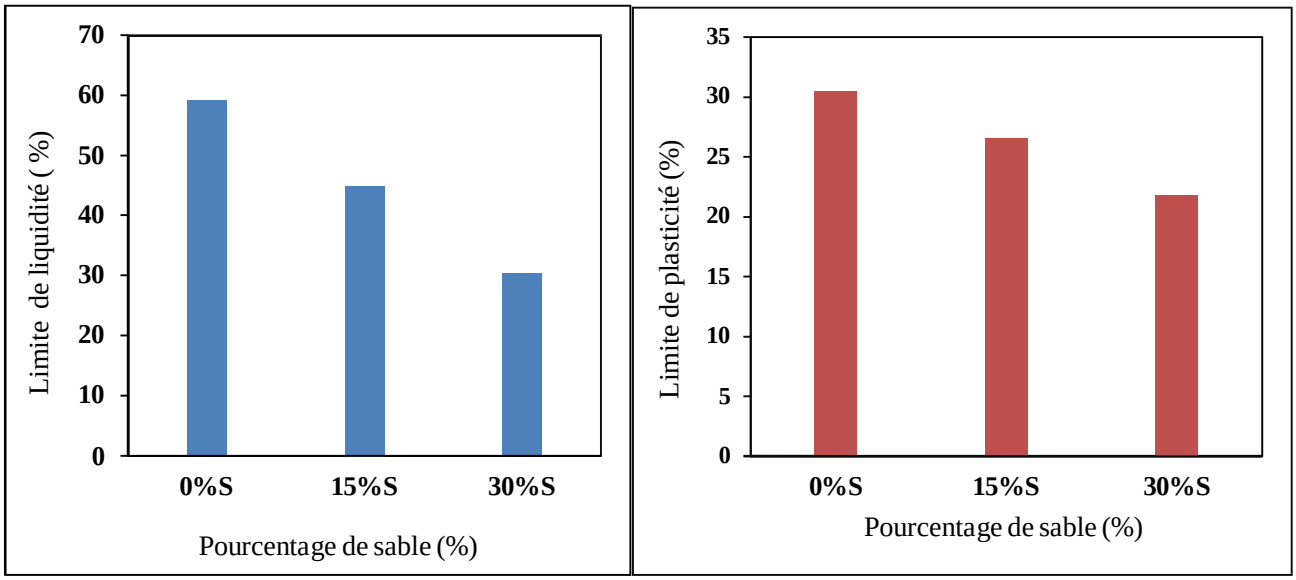


Figure IV.3 : Influence de sable de dune sur les limites de consistances.

La figure IV.4 présente l'évolution de l'indice de consistance des mélanges dans l'l'abaque de Casagrande. On observe une tendance nette à la baisse de cet indice avec l'augmentation de la teneur en sable , l'ajout de 30% de sable de dune permet de modifier la classification de l'argile plastique vers une argile peu plastique .

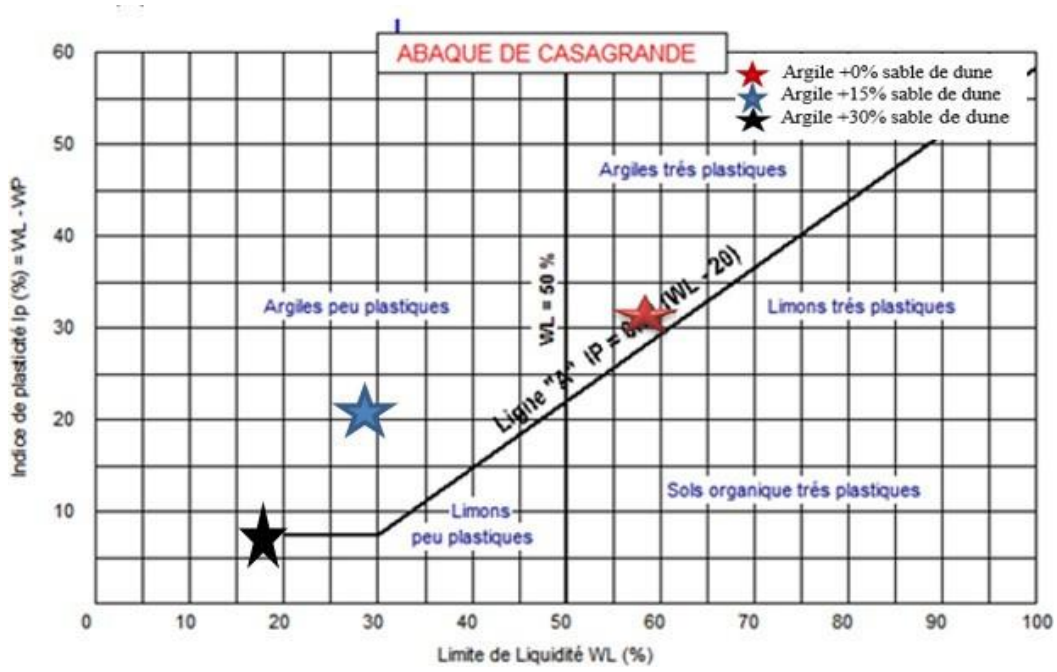


Figure IV.4 : Classification des mélanges (argile + sable de dune) dans l'abaque de Casagrande.

IV.3.1.3. Effet de l'ajout de sable de dune sur la valeur de bleu méthylène

Les résultats expérimentaux montrent l'influence de l'ajout de sable de dune sur la valeur de bleu de méthylène et la surface spécifique totale de l'agile étudié sont résumés dans le tableau IV.2 .Ces résultats seront traduits par une représentation graphique sur les figures IV.5 , IV.6.

Tableau IV.2 : Résultats de l'essai de valeur de bleu méthylène des mélanges argile-sables de dune .

Mélanges	Volume adsorbé(ml)	VBS(ml/g)	Sst (m^2/g)
Argile +0% Sable	360	6	126
Argile +15% Sable	300	5	105
Argile +30% Sable	210	3,5	73,5

VBS : Valeur de bleu méthylène ; **Sst** : Surface spécifique totale.

Sur la base des résultats obtenus, on remarque une réduction de la valeur de bleu méthylène est proportionnelle avec le pourcentage de sable de dune ajoutée . Pour un ajout de 30% de sable de dune au sol argileux la diminution de la valeur de bleu méthylène est d'environ 41%. La surface spécifique totale réduit, avec l'augmentation du pourcentage de sable additionné .Ceci peut se confirmer par la réduction de limite de liquidité des mélanges. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Bengraa (2004**)** qui ont montré que le sable réduit la surface spécifique totale, car la fraction argileuse devient de plus en plus faible avec l'ajout de sable. De même, Amri 2019 ,ont conclu que l'ajout de quantités croissantes de sable au sol argileux (jusqu'à 40%) a mis en évidence une diminution de la surface spécifique de l'order 48%

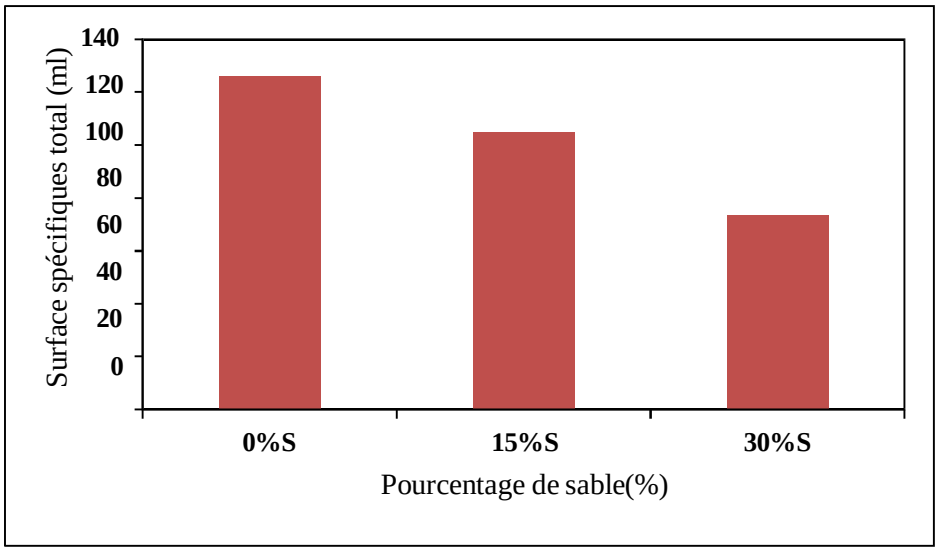


Figure. IV.5 : Influence de sable de dune sur le volume de bleu de méthylène.

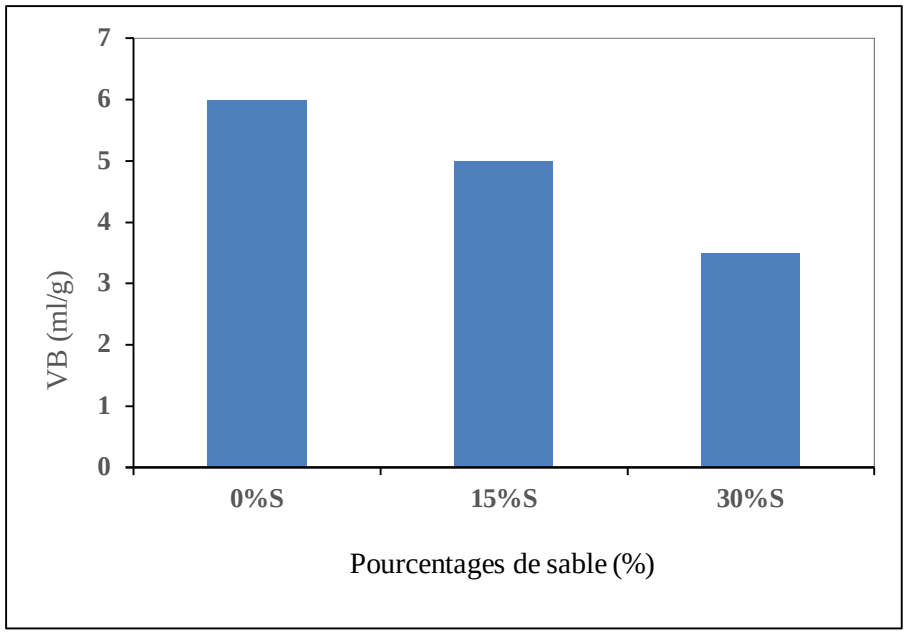


Figure. IV. 6 : Influence de sable de dune sur la surface spécifique totale.

IV.3.1.4. Effet de l'ajout de sable de dune sur les paramètres de Proctor

L'essai Proctor standard est réalisé sur les différents mélanges argile-sable de dune. Les résultats obtenus sont donnés dans les courbes de compactage dans la figure au-dessous.

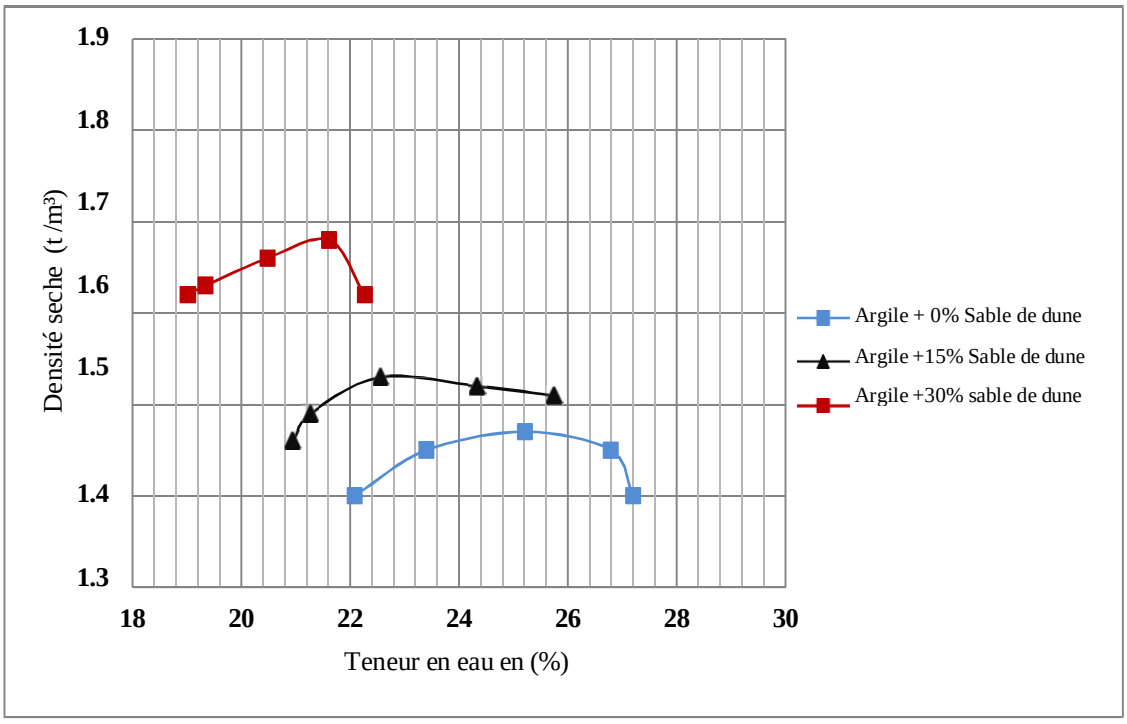


Figure. IV.7 : Résultats de l'essai de Proctor pour les mélanges argiles- sable de dune .

Le tableau IV.3 résume les résultats de l'essai de Proctor normal pour les différents mélanges argile- sable de dune .

Tableau IV.3 : Influence de l'ajout de sable sur les paramètres de Proctor

Mélanges	$\gamma_{d\ max}$ (t/m³)	Wopt (%)
Argile +0% Sable	1,47	25,21
Argile +15% Sable	1,53	22,5
Argile +30% Sable	1,68	21,61

$\gamma_{d\ max}$: Densités sèche maximale ; **Wopt :** Teneur en eau optimale .

Les figures IV.8 IV.9 représente graphiquement l'évolution de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de sable de dune ajouté. A travers ces figures, nous remarquons que l'ajout de sable de dune produit une augmentation progressive de la densité sèche maximale, accompagnée d'une diminution de la teneur en eau optimale. En effet, les valeurs passent de 1,47 t/m³ et 25,21 % pour l'argile non traitée à 1,68 t/m³ et 21,61 % avec 30% de sable de dune respectivement. Cela est expliqué par la modification de la structure granulométrique et diminution du taux des particules fines après l'ajout de sable de dune . Ces observations sont en accord avec les résultats (Farooq and Virk 2009 ; Mekkiyah, and Al-Khazragie 2015 ; Amri et al 2019).

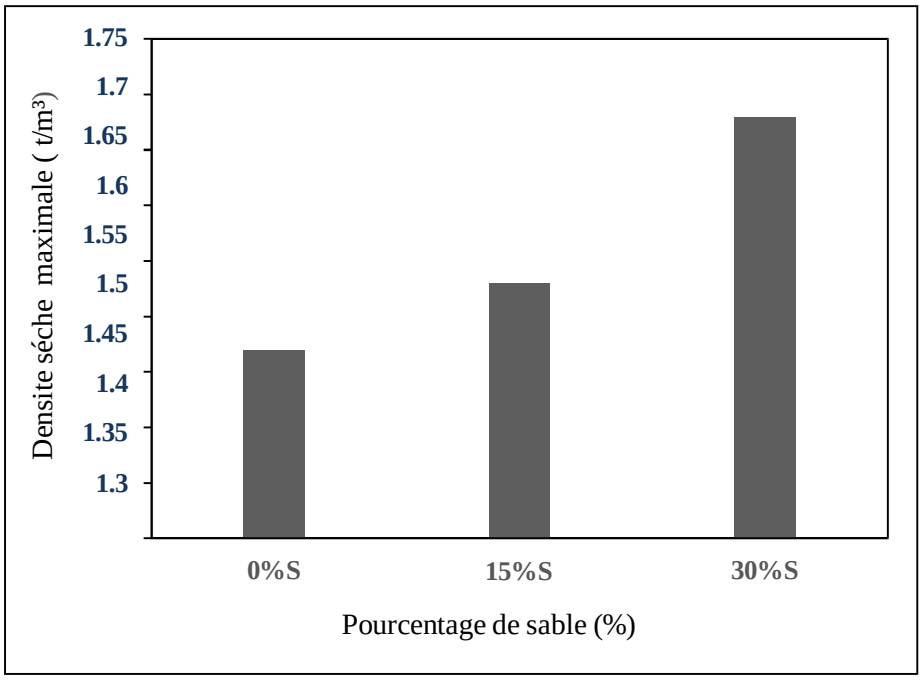


Figure. IV. 8 : Effet de l'ajout de sable sur la densité sèche maximale.

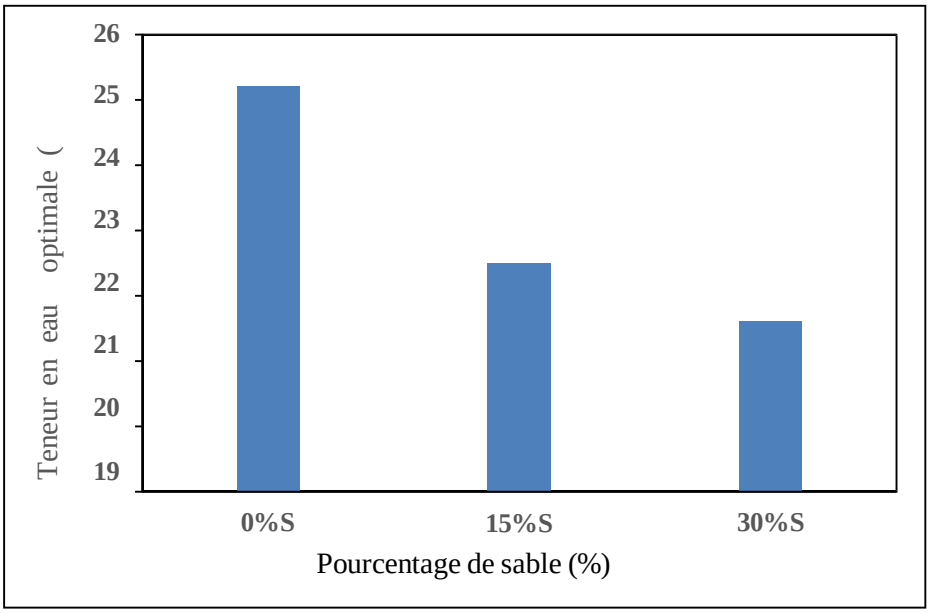


Figure. IV. 9 : Effet de l'ajout de sable sur la teneur en eau optimal.

IV.3.1.4. Effet de l'ajout de sable de dune sur la résistance au cisaillement

Pour étudier l'évolution des caractéristiques mécaniques (cohesion et angle de frottement) de l'argile traitée par des différents teneur de sable de dune . L'essai réalisé est de type non consolidé non drainé (UU). En appliquant des contraintes de compression de 1, 2 et 3 bars aux mélanges . Les courbes contraintes déformation des mélanges sont illustrées dans les figures. IV. 10 ,. Selon le tableau IV.4 et les figure IV.11, IV.12 qui représentent la variation de la cohesion et l'angle de frottement des mélanges, on remarque que l'ajout de sable de dune dans le sol argileux a provoqué une diminution notable de la cohésion, accompagnée d'une augmentation de l'angle de frottement interne. Nous observons que la cohésion diminué significativement de 45 kPa pour l'argile non traitée à une valeur de 11 kPa pour l'argile traitée par 30% de sable de dune avec un taux de diminution d'environ 75%. D'autre part, nous ont noté une augmentation proportionnelle de l'angle de frottement interne avec l'ajout de sable de sable de dune Les mêmes tendances ont été observées par différant chercheur Bengraa (2004**) ;** . Jjuuko et al 2011) .

Tableau IV. 4 : Valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement interne pour les mélanges(argile +sable).

Mélanges	C (kPa)	φ (°)
Argile +0% Sable	45	8
Argile +15% Sable	35	12
Argile +30% Sable	11	21

C cohesion ; φ angle de frottement

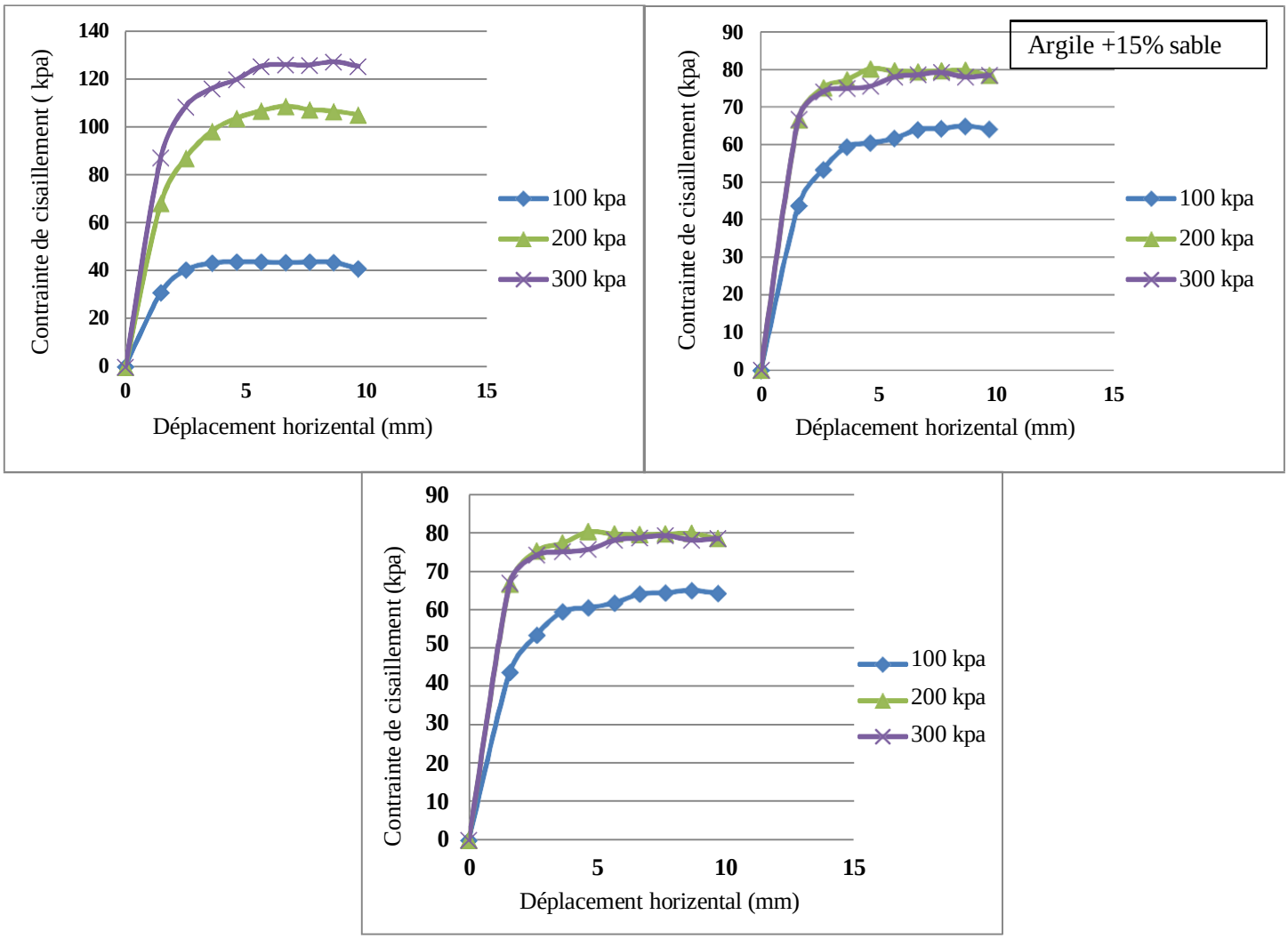


Figure IV.10 : Influence de sable de dune sur la contrainte de cisaillement des mélanges (argile +sable).

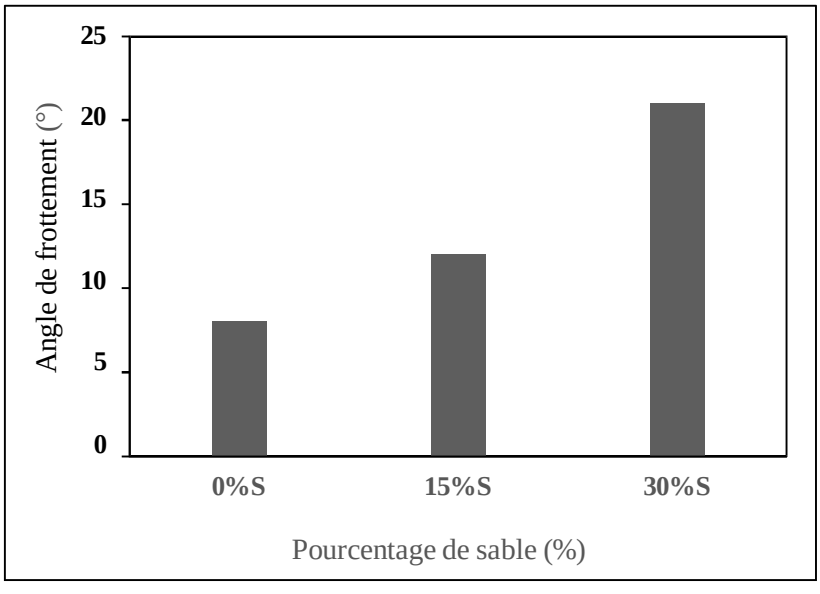


Figure. IV. 11 : Effet de l'ajout de sable dune sur l'angle de la cohesion .

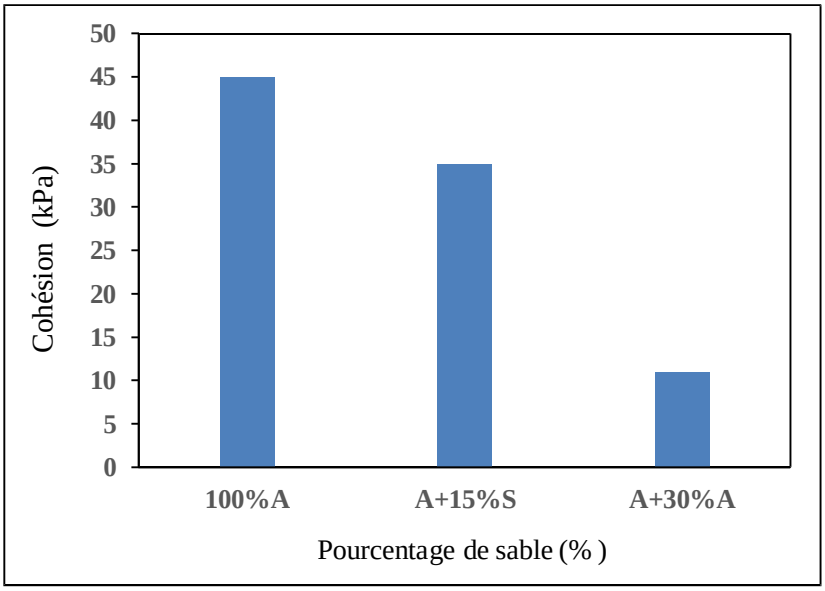


Figure. lV. 12 : Effet de l'ajout de sable de dune sur l'angle de frottement.

IV.3.1.5 .Effet de l'ajout de sable sur l'essai œdométrique

L'essai œdométrique a été effectué sur une argile sans traitement ainsi que sur ses mélanges incorporant respectivement 15 % et 30 % de sable de dune .La figure IV. 13 et le tableau IV .5, montre les résultats de l'effet de sable de dune sur la variation de la compressibilité et potentielle de gonflement. La reduction de l'indice de gonflement avec l'augmentation de la teneur de de sable de dune est tout à fait remarquable dans le tableau IV .5. L'indice de gonflement passe de 3,51% à 2,84% avec un ajout de 30% de sable de dune. Le tableau le tableau IV .5,, montre aussi les résultats de l'effet de sable de dune sur la variation de la compressibilité . Les valeurs d'indice de compressibilité réduit à 15, 65% pour0%, et 12.98% pour l'ajout de 0% et 30% sable de dune

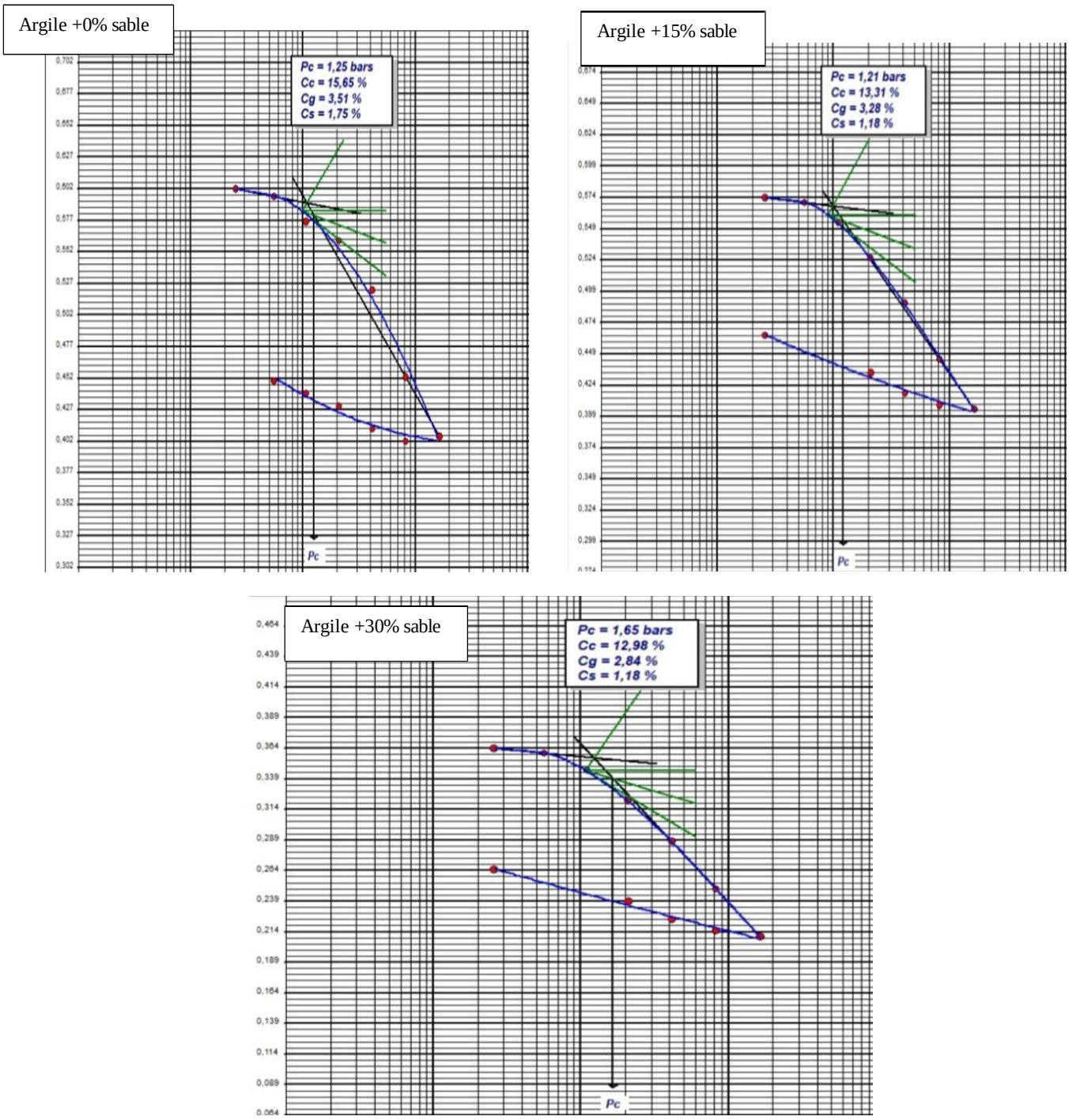


Figure. IV. 13 : Influence de sable de dune sur l'essai de compressibilité sur les mélanges.

Tableau. IV. 5 : Effet de l'ajout de sable dune sur les paramètres de compressibilité.

Paramètres	Pc (bars)	Cc(%)	Cg(%)	Cs(%)
Argile +0% Sable	1,25	15,65	3,51	1,75
Argile +15% Sable	1,21	13,31	3,28	1,18
Argile +30% Sable	1,65	12,98	2,84	1,18

IV.3.2. Renforcement par fibres de polypropylène une argile traitée par le sable

Afin de voir de l'effet des fibres de polypropylène (1 % et 2 %) sur le comportement mécanique d'une argile traitée par 30 % de sable de dune. Pour cela, plusieurs essais mécaniques (essai Proctor normal, essai de cisaillement en boîte et essai œdométrique) ont été réalisés sur les mélanges .

IV.3.2.1. Influence des fibres de polypropylène sur les caractéristiques de compactage d'une argile traitée

L'ajout des fibres de polypropylène à une argile traitée par 30 % de sable a entraîné une modification notable des paramètres de compactage, comme montre la figure lV. 14 et le tableau IV.6 , tandis que l'evolution de la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale sont donnée dans les figures IV. 15 et IV.16.

Tableau IV. 6 : Influence de l'ajout de sable et des fibre PP sur les paramètres de Proctor.

Mélanges	Densité sèche max (t/m ³)	Teneur en eau(%)
Argile +0% Sable	1,47	25,21
Argile +30% Sable	1,68	21,61
Argile +30% Sable +1% des fibres de polypropylène	1,68	21,75
Argile +30% Sable +2% des fibres de polypropylène	1,64	22,9

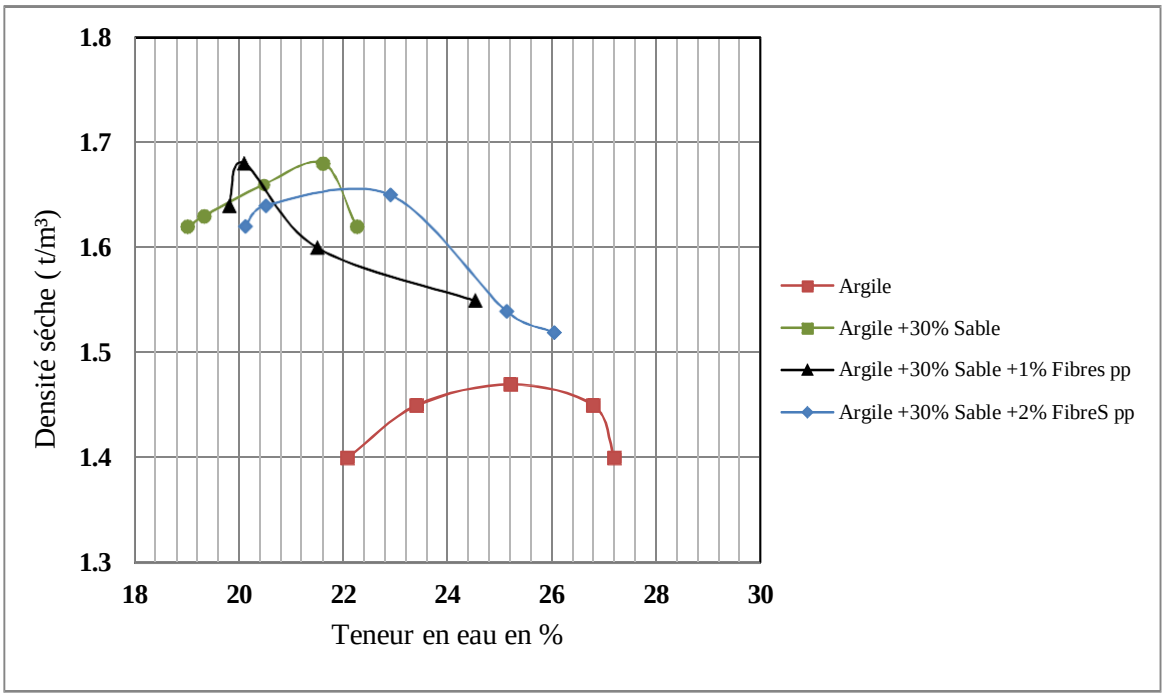


Figure. IV.14 : Résultats de l'essai de Proctor pour les mélanges argiles- sable de dune +fibres pp.

A partir des résultats du tableau précédent, les figures IV. 15 et IV.16 représentent graphiquement la variation de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de sable de dune ajouté. . On peut constater que l'ajout de des fibres de polypropylène réduit progressivement la densité sèche maximale de l'argile traitée par 30 % sable de dune. Qui passe de 1,68 t/m³ pour un pourcentage de 30% de sable , à 1,64 t/m³ pour un pourcentage de 30% de sable de dune et de 2 % des fibres de polypropylène tandis que, la teneur en eau optimale augmente légèrement, atteignant 22,9 % à 21,61 % pour l'argile traitée par 30% de sable de dune et l'argile traitée par 30% de sable + 2% des fibres de polypropylène .

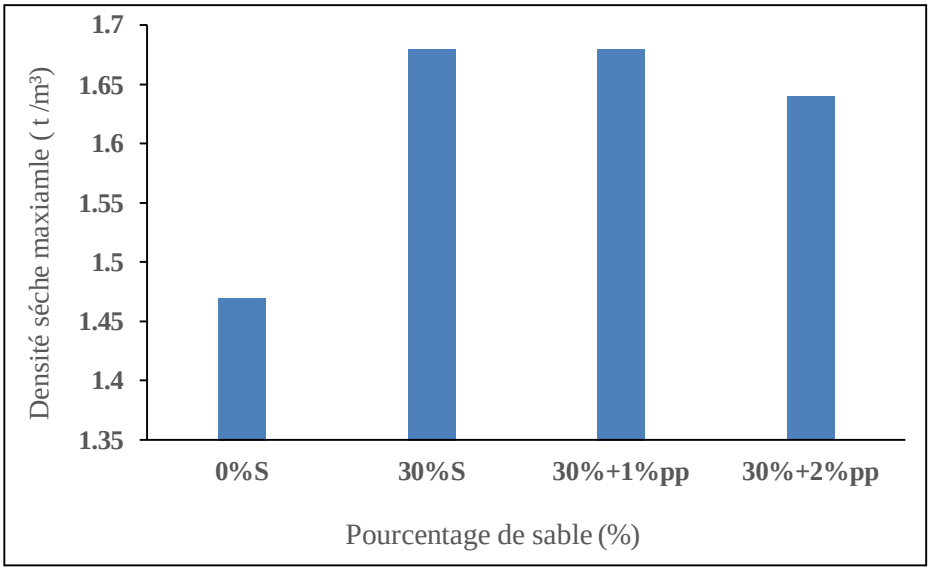


Figure. IV. 15 : Effet des fibres pp et le sable de dune sur la densité sèche maximale.

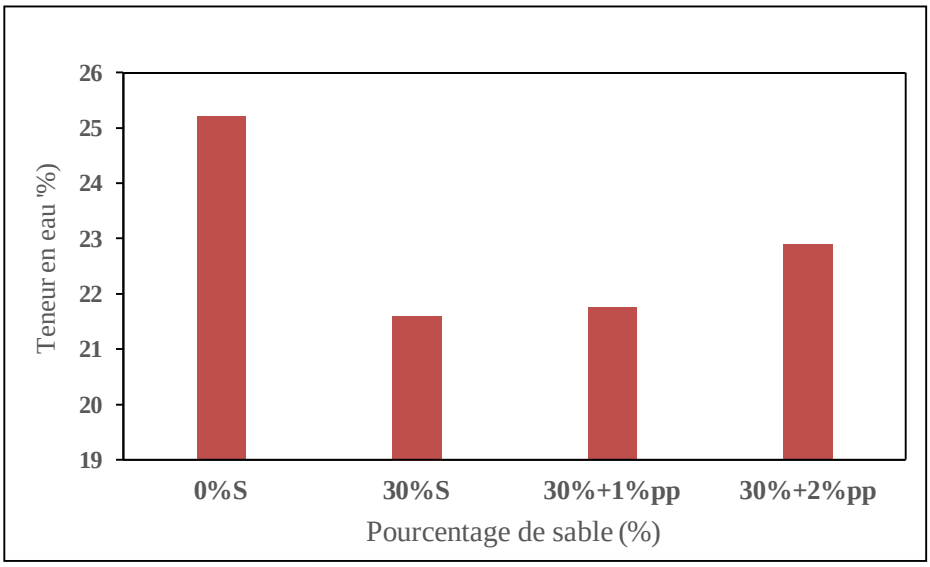


Figure. IV. 16 : Effet des fibres pp et le sable de dune sur la teneur en eau optimale .

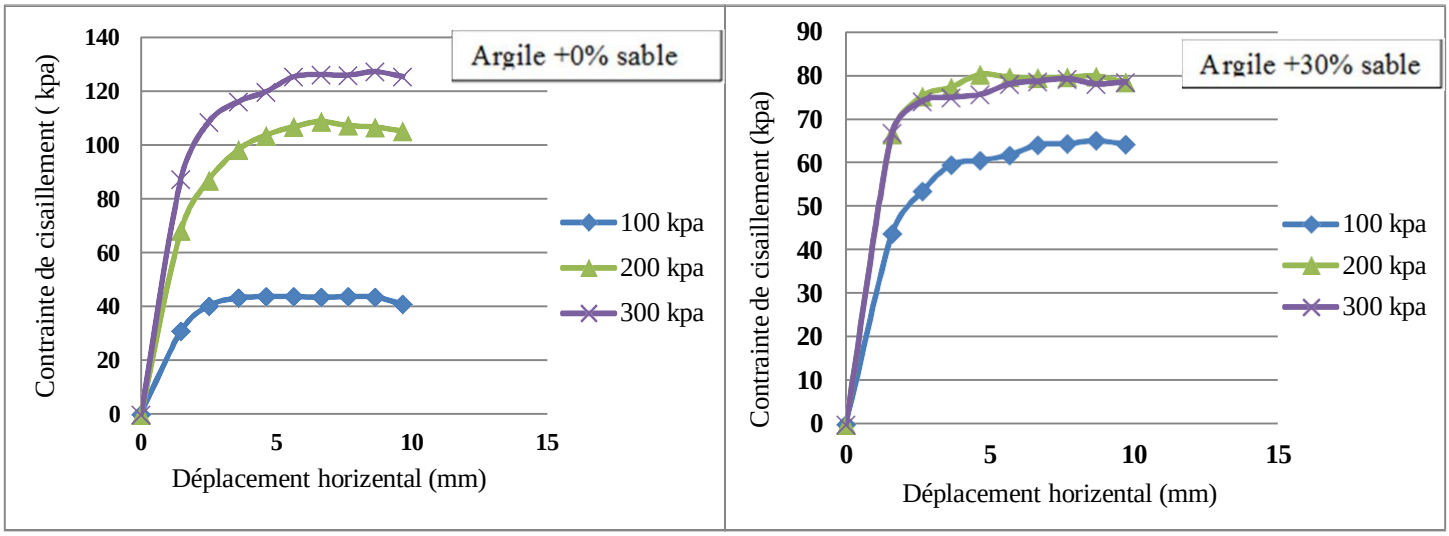
IV.3.2.2. Influence de l'ajout des fibres de polypropylène sur la résistance au cisaillement d'une argile traitée par le sable dune

Afin d'étudier l'impact des fibres de polypropylène sur les propriétés de cisaillement d'une argile traitée par 30% de sable de dune , une campagne d'essais de cisaillement non consolidé non drainé a été menée sur plusieurs mélanges, chacun comportant une teneur en fibres pp différente (1 % et 2 %). Les courbes contraintes déformation des mélanges sont illustrées dans les figures. IV. 17, le tableau IV.7. Les figures IV.18 et IV.19 présentent l'évolution des deux principaux paramètres de cisaillement – la cohésion et l'angle de frottement – en fonction du taux de fibres introduit dans le mélange argile-sable.

Tableau IV. 7: Valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement interne pour les mélanges(argile +sable+ fibres pp).

Mélanges	Cohesion (kPa)	Angle de frottement (%)
Argile +0% Sable	45	8
Argile +30% Sable	11	21
Argile +30% Sable +1% des fibres	27	15
Argile +30% Sable +2% des fibres	39	17

Les résultats obtenus indiquent une augmentation de l'angle de frottement et la cohésion en fonction du taux de fibres de polypropylène ajouté à l'argile traitée avec 30 % de sable, passant de(21°, 11 kpa) à (17°, 39 kpa) pour une teneur en fibres de 2 %. Cette amélioration est attribuée à un effet synergique entre le sable et les fibres pp: le sable optimise la structure du sol et renforce la friction interne, tandis que les fibres assurent un renforcement mécanique par liaison



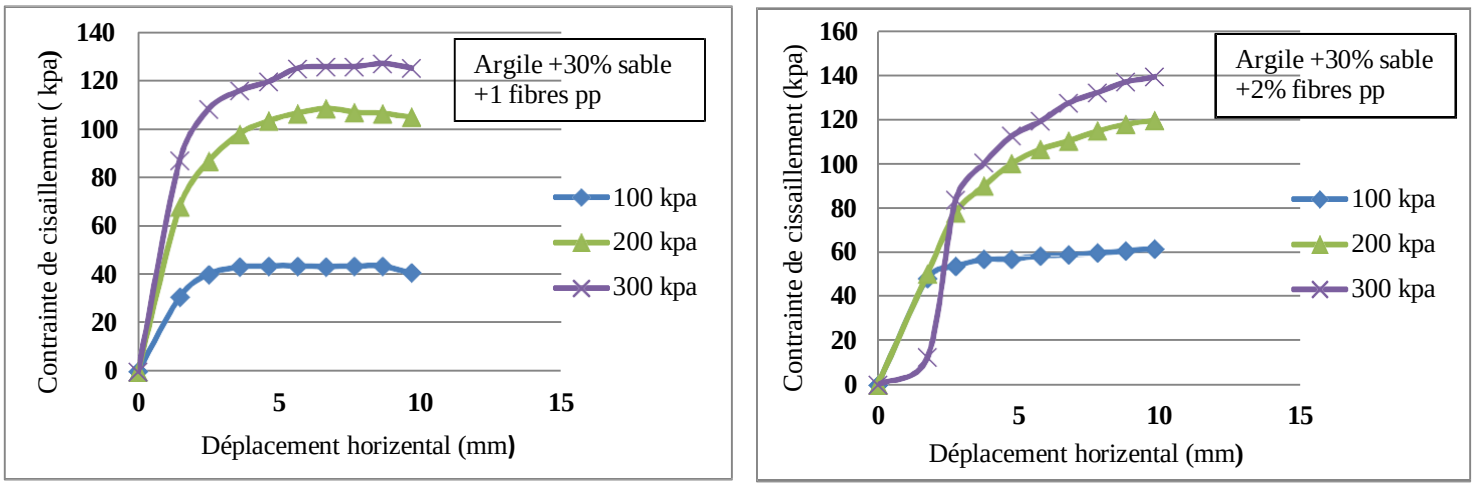


Figure. IV. 17 : Influence des fibres pp et sable de dune sur la contrainte de cisaillement

.

he

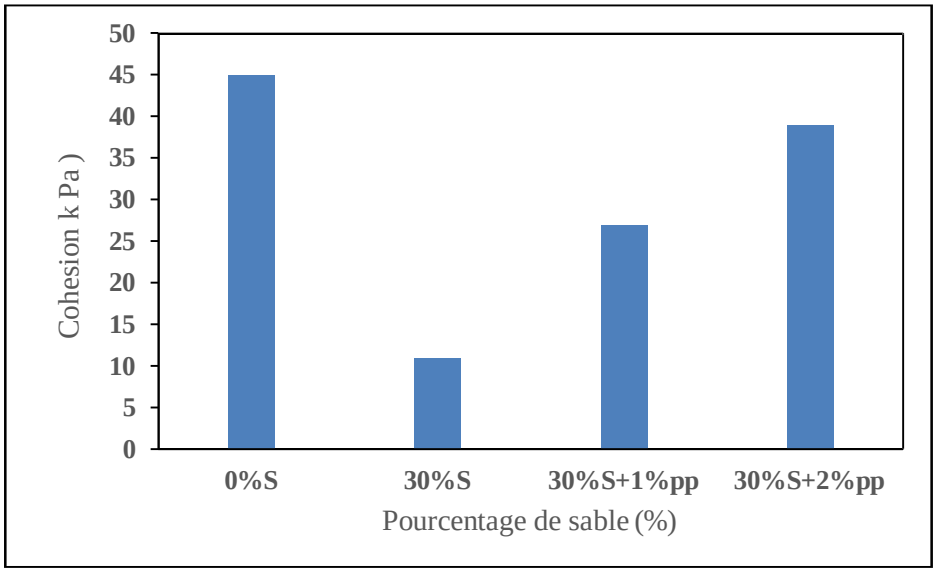


Figure. IV. 18 : Effet de fibres pp sur la cohésion d'une argile traitée par le sable .

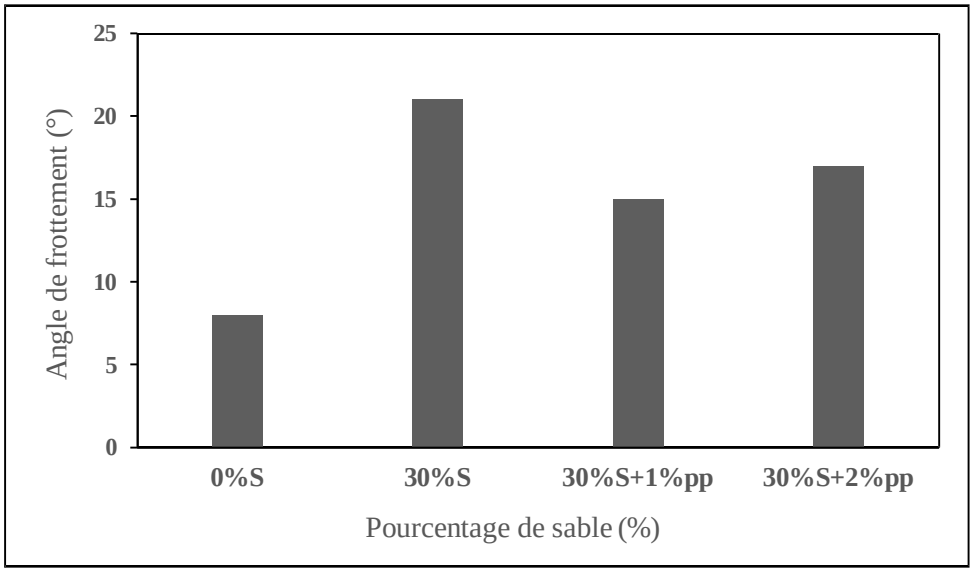


Figure. IV. 19 : Effet de fibres pp sur l'angle de frottement d'une argile traitée par le sable.

IV.3.2.3. L'influence de l'ajout de fibres de polypropylène sur les paramètres de compressibilité d'une argile traitée par le sable dune

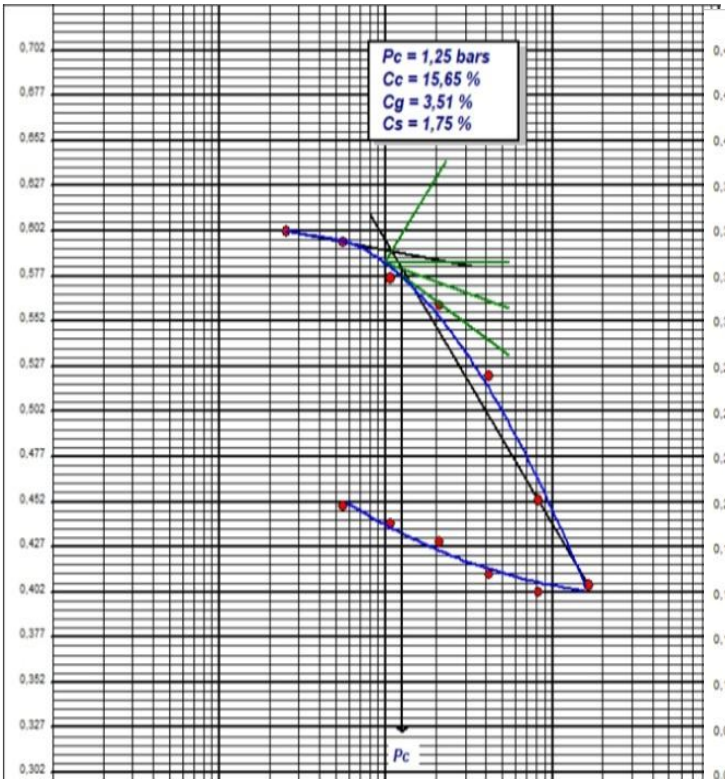
Afin de voir l'effet des fibres de polypropylène sur les paramètres de compressibilité d'une argile traitée par 30% de sable de dune , une série d'essais de gonflement a été menée sur plusieurs mélanges, chacun comportant une teneur en fibres différente (1 % et 2 %). La figure IV. 20 , montre les résultats de l'effet des fibres de pp sur la variation de l'indice de compressibilité des sols traitée par le sable de dune. On constate que l'indice de compressibilité réduit pour le pourcentage 1% de fibres de pp et 30 % de sable de dune jusqu'à la valeur 11.29%. À 11.99%, ensuite augmente légèrement à une valeur de 11.99%

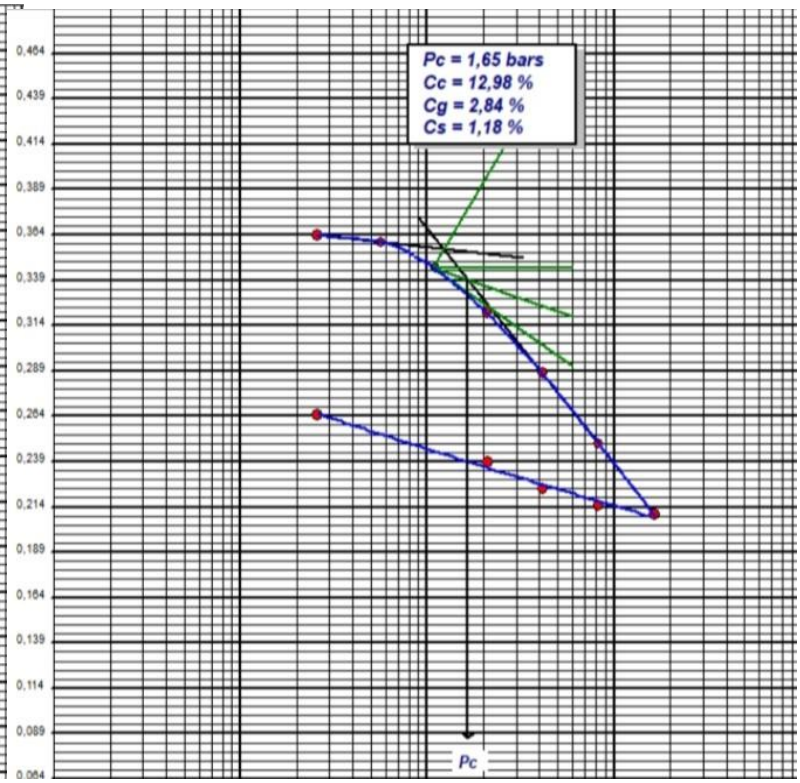
pour l'ajout de 2% de fibres de pp et 30% de sable de dune. Cette diminution est due à la composition minéralogique des mélanges.

On remarque que dans le tableau. IV.8 . qu'il y a une amélioration dans les l'indice de gonflement avec l'augmentation des pourcentages de fibre pp , l'indice de gonflement du sol non traité est 3, 51%, il diminue jusqu'à 2,11% pour une teneur de 2% de fibres pp et 30% sable de dune ,cette diminution est dû à l'effet favorable de fibre pp pour stabiliser le gonflement, donc le sol amélioré par les fibre pp change de structure et de texture. Ces résultats ont été confirmés dans la littérature CHAA (2020).

Tableau. IV. 8 : Effet de l'ajout de fibres PP et sable dune sur les paramètres de compressibilité

Mélanges	Pc(bars)	Cc(%)	Cg(%)	Cs(%)
Argile +0% Sable	1,25	15,65	3,51	1,75
Argile +30%Sable	1,65	12,98	2,84	1,18
Argile +30%Sable +1%pp	1,29	11,29	2,61	2,65
Argile +30%Sable +2%pp	1,48	11,99	2,11	1,46





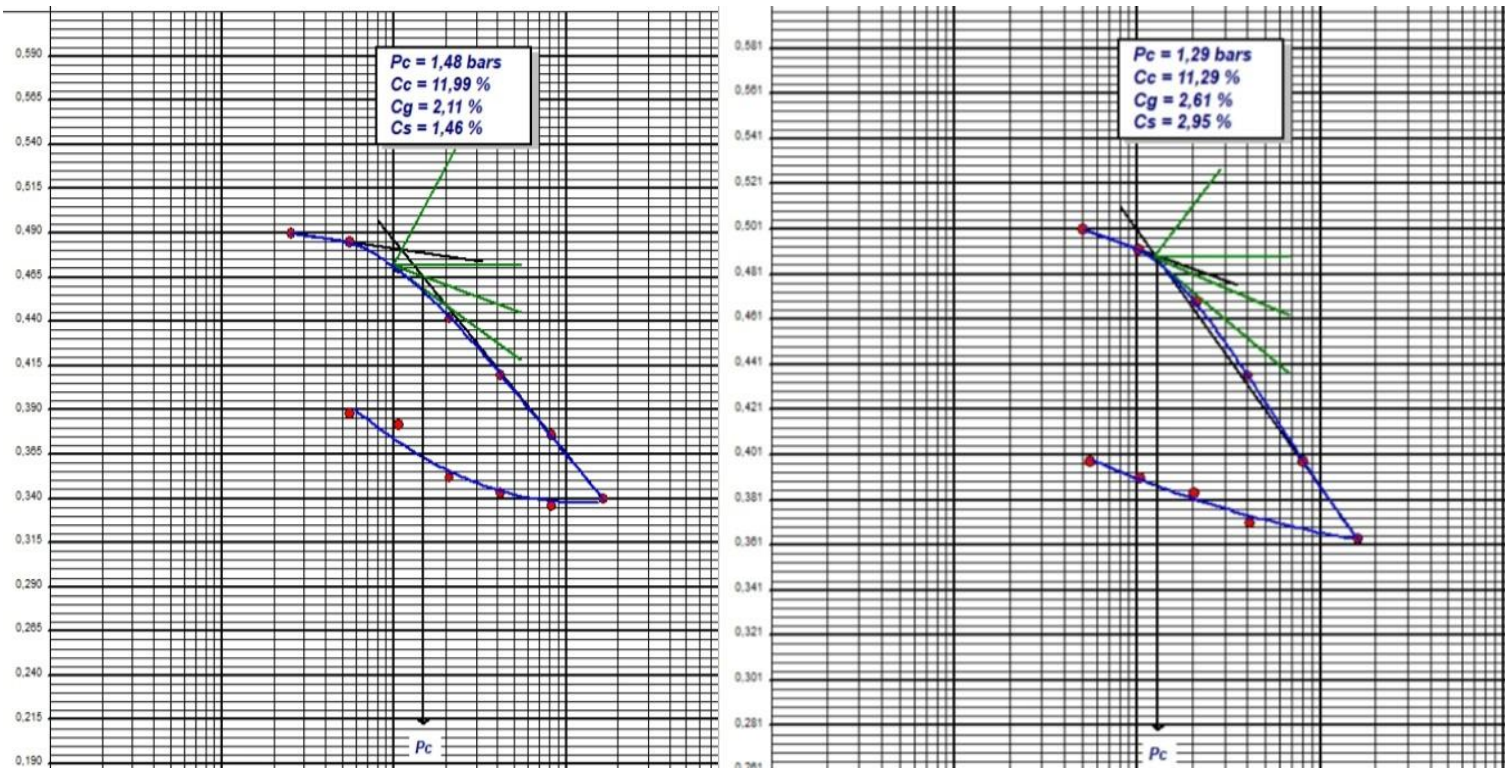


Figure. IV. 20 : Influence de l'ajout de fibres pp et le sable de dune sur les paramètres de l'essai oedométrique

IV.4. Conclusion

Cette investigation expérimentale a été menée afin d'évaluer l'influence de l'incorporation de fibres de polypropylène et le sable de dune sur les comportement d'une argile plastique . L'analyse des résultats expérimentaux conduit aux observations et conclusions suivantes :

- Une diminution importante de la plasticité de l'argile étudiée après l'ajout de sable dune.
- L'addition de sable de dune au sol argileux produit une diminution de la valeur de bleu de méthylène qui a provoqué une réduction de la capacité d'échange cationique ;
- L'ajout de sable a induit une augmentation de la densité sèche maximale (γdmax) ainsi qu'une réduction de la teneur en eau optimale (Wopt), conformément aux résultats des essais Proctor normale ;
- On note une amélioration considérable dans les paramètres de cisaillement de l'échantillon traité par le sable de dune ;
- Les essais œdométriques sur les mélanges (argile +sable de dune) ont montré une réduction de l'indice de compressibilité et l'indice de gonflement , en corrélation directe avec le taux d'incorporation de sable de dune ;

- Un pourcentage de 30 % en poids de sable s'est révélé être le taux d'optimisation le plus performant pour le sol étudié ;
- L'addition des fibres de polypropylène au sols argileux traitée par 30% de sable de dune a entraîné une diminution de la densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale, traduisant une modification du comportement de compactage du mélange ;
- La présence des fibres de polypropylène au sol argileux traitée par 30% de sable de dune a significativement renforcé les propriétés mécaniques du sol traité, avec un effet particulièrement prononcé sur l'augmentation de la cohésion :
- Enfin, l'introduction des fibres de polypropylène au sols argileux traitée par 30% de sable de dune a permis une amélioration de l'indice de compressibilité et l'indice de gonflement

Conclusion général

Le traitement des sols argileux par le sable 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 plastique provenant Haouch Bayazid dans la wilaya de Médéa traité par le sable de dune (0 % , 15% ,30%) et le fibres de polypropylène (1% , 2%) .

Les résultats obtenus dans ce mémoire permettent de voir que l'introduction de sable de dune et les fibres de polypropène dans le sol 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 30% de sable de dune c'est dosage optimale de notre matériau étudié ;
- Une augmentation de la densité sèche maximale avec une diminution de la teneur en eau optimales a été obtenus après le traitement par le sable de dune ;
- l'ajout de sable de dune produit une diminution de l'indice de plasticité cette diminution été en fonction de pourcentage de sable ajoutée ;
- En effet, le traitement par le sable de dune a réduit la valeur de bleu méthylène par consequence réduit sa la sensibilité à l'eau ;
- L'ajout de sable de dune au sol argileux produit une réduction de l'angle de frottement avec une augmentions de la cohesion ;
- Le potentiel de gonflement ainsi que la pression du gonflement ont été réduit après l'ajout de sable de dune à différents dosages ;
- L'ajout des fibres de polypropylène à l'argile traitée par le sable de dune modifiant les caractéristiques de compactage, en effet la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente ;
- Une augmentation de l'angle de frottement et la cohésion a été obtenus après l'ajout de fibres de polypropylène au matériau argileux traitée par le sable de dune .
- L'ajout de quantités croissantes de fibre de polypropylène au sol argileux traitée par le sable de dune a mis en évidence une reduction de la coefficient de gonflement et coefficient de compressibilité .

Les références bibliographiques

ADEM, H. H. et VANAPALLI, S. K., Review of methods for predicting heave/shrink of expansive soils over time, Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Canada, 2015, 68 pages.

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

Al-Rawi, N. M., (1981), -"The effect of curing temperature on lime stabilization", Proc. 2nd Conf. on Engineering Materials, Sydney, 611-662.

Amri S, Akchiche M, Bennabi A, Hamzaoui R (2019) Geotechnical and mineralogical properties of treated clayey soil with dune sand. Journal of African Earth Sciences, 152:140-150.

BALHACHEMI SARRA, BERRAFA FATOUMA IMANE(2016/2017): La valorisation de sable de dune (sable de Naama) Durabilité et comportement mécanique, Mémoire de MASTER.

BERTHELOT ,P, comportment des argiles dans les environnements arides , editions technique , paris, 2002,210 pages.

BEKHOUCHE Hizia (2018) Traitement par le ciment des sols gonflants non saturés (Cas de la région des Aurès) these de doctorat Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd.

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

BELLATRACHE Youcef (2012) Comportement des argiles naturelles et traitées d'Ain Amenas en fonction de la teneur en eau. mémoire magister université Kasdi Merbah – Ouargla.

BENYAHIA Sabah 2022 Le phénomène retrait gonflement des sols argileux et leur stabilisation par la chaux et aux liants hydrauliques: aspects minéralogiques et géotechniques (région de Batna et d'Oum-El-Bouaghi) these doctorat Université Mohammed Seddik Benyahia- de Jijel.

BENGRAA Lahouaria 2004 ; contribution a l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout de sable : Application aux sols d'Oran. Mémoire de magister .Université des Sciences et de la Technologie d'Oran .

Ben Ouakhir Abdel Hakim «Utilisation du sable de dunes en technique routière Etude bibliographique ». Mémoire de Master, Université Mohamed KhiderBiskra. Mémoire de magister Spécialité : Génie civil Présenté par AZZOUZ Hocine : Etude des bétons à base des sables de dune 03/05/2009 université MOHAMED KHEIDER BISKRA.

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.

Burwash W.J., 2001. Case History of a 9m high geogrid reinforced retaining wall backffiled with cohesive soil. Geosynthetics'91 Conference Alanta, USA.

Callière ,s.et Hénin,s.(1962.minéralogie des argiles .paris : Masson.

CHAA Khalissa (2020) Etude de l'effet des fibres de polypropylène sur les caractéristiques de déformabilité d'une argile stabilisée. Mémoire de Master Université Mohamed Boudiaf - M'SILA.

Cheng, L., Cord-Ruwisch, R., & Shahin, M. A. (2018). Stabilisation des sols par biocimentation: état de l'art et perspectives. Construction and Building Materials, 158, 1066–1079.

Dani, S et Missouri A, (2016), Etude physico-chimique de mortier de plâtre à base sable Renforcé de fibres synthétique et végétale, universite Akli moand oulhadje-bouira.

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

Devi, C. A., Rajkumar, R., & Krishnan, P. (2019). Étude sur l'amélioration des sols argileux à l'aide de fibres synthétiques. International Journal of Civil Engineering and Technology, 10(2), 112–121.

Didier, G., (1972), —Gonflement Cristallin et Macroscopiques de Bentonite‖, Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon.

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.

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

Myriam DUC .(2020). Les argiles dans le génie civil : pathologies et propriétés remarquables. Habilitation a diriger des recherches. Université Paris Est.

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.

Egu, E. O., Uche, O. A., & Okeke, N. A. (2024). Effets des matériaux stabilisants sur le comportement mécanique des sols argileux. African Journal of Engineering Research, 14(3), 78–85.

Farooq K, Virk KA (2009) Improvement of engineering characteristics of expansive clays by sand mixing. In: Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypte, 785–788.

FERRAH Ferrah (2006) - Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des fondations superficielles Thèse pour l'obtention du diplôme de MAGISTER Spécialité : Génie Civil Option : Mécanique des sols - Université El Hadj Lakhedar Batna.

Gadouri, M. (2017). Traitement des sols argileux par ajout de matériaux granulaires. Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Algérie.

Goufi Abd Elmalik (2022) Comportement mécanique et hydraulique à l'appareil triaxial dynamique des sols fins argileux améliorés par l'ajout du sable de dunes these de doctorat .Université Hassiba Benbouali de Chlef.

Grim, R. E. (1959) Physico-Chemical Properties of Soils: Clay Minerals. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 85, No SM2, 1–17.

Guler, E., M. Hamderi et M. Demirkan (2007). Numerical analysis of reinforced soil retaining wall structures with cohesive and granular backfills. Geosynthetics International, 14,no.6.

HAFSI, A., 1998. Théorie de la Double Couche et Gonflement des Argiles Non Saturées. Revue Scientifique, Algérie Equipement.

Hamid ,G. (2017). Influence de la présence des sulfates sur le traitement des sols argileux par des ajouts minéraux, thèse de doctorat. Université Médéa.

Hamza, S., Belarbi, R., & Chouicha, D. (2022). Amélioration des propriétés géotechniques des sols fins par l'ajout de fibres de polypropylène. Revue des Sciences et Technologies, 17(1), 45–53.

M. Harrat, Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique Etude sur site unité Maghreb céramique de Touggourt (Doctoral dissertation, Université de Ouargla-Kasdi Merbah) (2007).

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.

HOLTZ, R. D. et KOVACS, W. D., Introduction à la géotechnique, Prentice‐Hall, New Jersey, 1981, 733 pages.

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

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.

Jjuuko, S., Kalumba, D. and Bagampadde, U., 2011. The use of locally available sand in stabilization of Ugandan clayey soils: Case study of clayey soil from Busega area, Uganda Institution of Professional Engineers16thNational Technology Conference (NTC 2011),Umaru.

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

Khettaoui Cylia 2022 Influence de la nature du sable sur les caractéristiques physiques et mécaniques d'une argile. Mémoire de fin d'études Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Kollaros G. and Athanasopoulou A. (2016) Sand as a soil stabilizer Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. L, p. 770-777.

Lawton, E. C., Fragaszy, R. J., & Hetherington, **M. D. (2004).** Amélioration des sols fins à l'aide de fibres synthétiques. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(2), 123–131.

Louafi, H., & Bahar, R. (2012). Comportement mécanique d'un sol stabilisé avec du sable et des fibres de polypropylène. Revue Algérienne de Géotechnique, 6(2), 63–74.

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

Mekkiyah, H. M., Al-Khazragie, A. (2015) Behavior of clay soil mixed with fine sand during consolidation Applied Research Journal Vol.1, Issue, 8, pp.437-443,

Meddah, A. and Merzoug, K. (2017) 'Feasibility of using rubber waste fibres as renforcements for Sandy soils', Innovative Infrastructure Solutions, 2(1), p. 5. Doi : 10.1007/s41062-017-0053.

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

Morel.R, Les sols cultivés. Lavoisier, Paris. Et M.E. Tucker, Sedimentary petrology. An introduction. Blackwell. Les argiles (u-picardie.fr) (2005).

Mouroux P., Margron P. et Pint J.C., (1988), "La construction économique sur sols gonflants‖, Manuels et méthodes n°14. B.R.G.M., Orléans.

Mousaab, N. (2018) ETUDE DU COMPORTEMENT D'UN SOL RENFORCE PAR .

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

Nelson J. D., et Miller D. J., (1992), “Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineering‖, Edition John Wiley et Sons, INC.

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.

Robitaille ,Denis. T. (1997).Mécanique de sol: théorie et pratique. ISBN 2-89113-658-6.

M. ROKBI, “Comportement a la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester-fibres de verre,” Mémoire de magistère, Centre universitaire mohamed boudiaf de m’sila, 2001.

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 GénieCivil.

Younoussa, M. (2008). Contribution à l'amélioration des sols gonflants par des matériaux locaux. Mémoire de Magister, Université de Ngaoundéré, Cameroun.

ZENKHRI Abderrezak (2009) - Solutions de construction sur sol potentiellement gonflant-Application à la région d’In-Aménas Thèse MAGISTER ANNÉE2009/2010.

ZUR A, WISEMAN G.(1973), A study of collapse phenomena of an undisturbed, Proc.Of the Inter. Conf. on soil Mech. And Found. Eng., Vol2.2.