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'étude de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Thème

Etude de l'effet de l'ajout des copeaux de bois sur le comportement mécanique de sol fin

---

Présenté par

LOURARI Billel **BERRAMDANI Mohamed**

Proposé et dirigé par

Dr. BENSAADA Abdelhalim

Promotion Juin 2024

Remerciement

Je remercie tout d'abord ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage de surmonter les moments les plus difficiles de ma vie et la volonté de mener à terme ce travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements, à M^{er} BENSAADA Abdelhalim Pour son suivi ses précieux conseils et orientations qui m'ont été d'une grande utilité tout au long de ce travail.

Je remercie tous les enseignants de l'université de MEDEA faculté des sciences et de la technologie pour le savoir qu'ils m'ont transmis.
Mon respect s'adresse aux membres de jury qui me feront l'honneur de juger ce travail.
Je remercie également mes camarades de promotion.

Je profite aussi de cette occasion solennelle pour adresser mes remerciements à toute Ma Famille qui m'a toujours encouragé et soutenu tout au long des années d'étude.

Nous n'oublierons jamais à remercie le directeur de laboratoire central des travaux publics de MEDEA (LCTP) 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.

Je remercie enfin tous ceux qui n'ont pas été cités dans ces quelques lignes et qui ont contribué de près ou de loin par leur aide au bon déroulement de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma mère pour son amour. Ses encouragements et ses sacrifices.

A mon père رحِمَه اللّٰه.

À mon encadrant, monsieur BENSAAD Abdelhalim, qui a été un guide précieux tout au long de ce projet. Votre expertise, votre soutien et vos conseils éclairés ont été essentiels pour mener à bien cette recherche. Je vous remercie sincèrement pour votre engagement et votre mentorat.

À tous les membres de ma famille

À tous mes amis et tous ceux qui m'aiment…

Dédicace spécial :

À tous les personnelles de LCTP

Merci

BERRAMDANI Mohamed

Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma mère pour son amour. Ses encouragements et ses sacrifices.

A mon père pour son soutien, son affection et la confiance qu'il Ma accordé.

À mon encadrant, monsieur BENSAAD Abdelhalim, qui a été un guide précieux tout au long de ce projet. Votre expertise, votre soutien et vos conseils éclairés ont été essentiels pour mener à bien cette recherche. Je vous remercie sincèrement pour votre engagement et votre mentorat.

À tous les membres de ma famille

À tous mes amis et tous ceux qui m'aiment…

Dédicace spécial :

À tous les personnelles de LCTP

Merci

LOURARI Billel

ملخص

تتميز التربة الناعمة بخصائص جيوتقنية رديئة يمكن أن تسبب أضراراً كبيرة .تُستخدم تقنيات مختلفة لتحسين خصائص التربة الناعمة، مثل المعالجة الكيميائية والميكانيكية والفيزيائية .وفي هذا السياق، أجرينا دراسة لتقييم تأثير إضافة رقائق الخشب على السلوك الميكانيكي للتربة الناعمة في منطقة كوالا بولاية المدية .تبدأ هذه الأطروحة بمراجعة الأدبيات المتعلقة بالتربة الناعمة وطرق ثباتها، تليها دراسة مخبرية تجريبية على نوع من التربة الناعمة(الطينية) فيما يتعلق بجرعات مختلفة من رقائق الخشب .أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن إضافة رقائق الخشب إلى التربة أثرت سلباً على خواصه الميكانيكية.

كلمات الرئيسية: التربة الناعمة؛ الطين, رقائق الخشب؛ السلوك الميكانيكي؛ المعالجة.

Résumé

Les sols fins sont caractérisés par une faible propriété géotechnique qui causant des désordres considérables. Diverses techniques sont adaptées pour améliorer les caractéristiques des sols fins tell que traitement chimique, mécanique, physique. Dans ce contexte, nous avons mené une étude visant à évaluer l'effet de l'ajout des copeaux de bois sur le comportement mécanique des sols fins dans la région de Kouala wilaya de Médéa. Cette mémoire dresse en premier lieu une revue bibliographique sur les sols fins et les méthodes de leur stabilité, puis une étude expérimentale a été présentée en laboratoire sur un type de sol fin (argile) en fonction de différentes doses de copeaux de bois. Les résultats obtenus ont montré que l'ajout de copeaux de bois au sol affectait négativement ses propriétés mécaniques.

Mots-clés : sol fin ; argile, copeaux de bois ; comportement mécanique ; traitement.

Abstract

Fine soils are characterized by poor geotechnical properties, which can cause considerable damage. Various techniques are adapted to improve the characteristics of fine soils, such as chemical, mechanical and physical treatment. In this context, we carried out a study to assess the effect of adding wood chips to the mechanical behavior of fine soils in the Kouala wilaya region of Medea. This dissertation first reviews the literature on fine soils and their stability methods, and then presents an experimental laboratory study on a type of fine soil (clay) as a function of different wood chip doses. The results obtained showed that the addition of wood chips to the soil negatively affected its mechanical properties.

Keywords: fine soil; clay, wood chips; mechanical behavior; treatment.

Sommaire

Remerciement
Dédicace
ملخص
Résumé
Abstract
Listes Des Figures
Liste Des Tableaux

Introduction générale……..1
Chapitre I : Généralités sur les sols fins.....2
I.1. Introduction.....2
I.2. Définition des sols fins 2
I.3. Composition minéralogique des sols fins 2
I.3.1. Les minéraux primaires 3
I.3.2. Les minéraux secondaires 3
I.3.3. Les sels solubles.....3
I.3.4. Les matières organiques.....3
I.4. Microstructure des sols fins 4
I.5. La structure des sols fins.....4
I.5.1. La structure compacte.....5
I.5.2. La structure particulaire.....5
I.6. La texture des sols fins.....5
I.7. Différents types de sols fins.....5
I.7.1.Les argiles 6
I.7.1.1. Définition des argiles.....6
I.7.1.2. Formation des minéraux argileux 6
I.7.1.3.Minéralogie et structure des minéraux argileux.....8
I.7.1.4.Classification des minéraux argileux 9
I.7.1.5.Différents types des minéraux argileux.....10
I.7.1.6. Principales caractéristiques des minéraux argileux 16
I.7.2.Définition des silts et des limons 18
I.7.3.Définition des sables fins 19
I.8.Principaux problèmes des sols argileux.....19
I.8.1. Retrait - gonflement.....20
I.8.2. Tassements.....20
I.8.3. Glissements.....21
I.8.4. Erosion des sols 21
I.9. Conclusion 22
Chapitre II : Techniques de stabilisation des sols fins.....23

II.1. Introduction 23
II.2. Définition et but de la stabilisation des sols 23
II.2.1.Définition 23
II.2.2.Principaux objectifs de la stabilisation 23
II.3.Différentes techniques de stabilisation 24
II.3.1.Stabilisation mécanique 24
II .3.1.1. La stabilisation mécanique par compactage 24
II .3.1.2. Le drainage 24
II .3.1.3. La technique de substitution 24
II .3.1.4. L'application de fortes pressions 25
II .3.1.5. Stabilisation par pré humidification 25
II .3.2. La stabilisation thermique 25
II .3.3. Stabilisation physique 25
II .3.4. Stabilisation chimique 26
II .3.4. 1. Stabilisation par les liants hydrauliques (Chaux, Ciment) 26
II.3.4.2. Stabilisation par polymères 28
II.3.4.3.Stabilisation par cendres volantes 29
II.4. Conclusion 29
Chapitre III : Présentation des matériaux d'étude 30
III.1. Introduction 30
III.2. Matériaux utilisés 30
III.2.1. Le marne 30
III.2.1.1. Localisation de site sol étudié 30
III.2.1.2. Caractéristiques géotechniques du sol étudié 31
III.3. Copeau de bois 47
III.4.Conclusion 48
Chapitre IV : Etude expérimentale de mélange (sol fin + copeau de bois) 49
IV.1. Introduction 49
IV.2. Préparation des mélanges 49
IV.3. Résulta et discussion 50
IV.3.1. Effet des copeaux de bois sur les limites d'Atterberg 50
IV.3.2. Effet de l'ajout des copeaux de bois sur les paramètres de Proctor 51
IV.3.3. Effet de l'ajout des copeaux de bois sur les paramètres de résistance au cisaillement 55
IV.4. Conclusions 62
Conclusion générale 62

Liste des figures

Chapitre I: Généralités sur les sols fins

Figure I.1 : Triangle de texture (Maëva Bourgeois, 1992). 5

Figure I.2 : Structure d'une couche à base d'octaèdre (Grim, 1962). 9

Figure I.3 : Schéma d'une couche de tétraèdre avec arrangement hexagonal 9

(Holtzetal, 1991). 9

Figure I.4 : Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles 11

(Mitchell, 1976). 11

Figure I.5 : Schéma de la particule de kaolinite. 12

Figure I.6 : Structure de Famille de la montmorillonite. 13

Figure I.7 : Structure de famille de l'illite. 14

Figure I.8 : A : Limon en vue macroscopique (Roy, 2015). 19

B : Limon à l'échelle microscopique (Stéphane Joly, 2011). 19

Figure I.9 : A : Sable fin à l'échelle Macroscopique (Roy, 2015) 19

B: Sable fin à l'échelle Microscopique (Roy, 2015) 19

Figure I.10: le risque retrait-gonflement des argiles 20

Figure I.11 : Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation 20

Figure I-12 : Glissement de terrain 21

Figure I.13: l'érosion de sol 21

Chapitre III : Présentation des matériaux d'étude

Figure III.1 : Localisation du site d'approvisionnement de sol étudié 30

Figure III.2 : Opération d'extraction de marne. 31

Figure III.3 : le sol étudié (Le marne) 31

Figure.III.4 : Essai de bleu méthylène(LCTP Médéa). 32

Figure III.5 : Classification GTR de sol par VBS 33

Figure III.6 : Essai d'analyse granulométrique par sédimentométrie (LCTP Médéa) 35

Figure III.7 : Les résultats des analyses granulométriques par sédimentation 35

Figure III.8 : Représentation des limites d'Atterberg. 36

Figure III.9 : Détermination de la limite de liquidité 37
Figure III.10 : Détermination de la limite de plasticité 38
Figure III.11 : Courbe limite de liquidité 39
Figure III.12 : Classification de l'échantillon selon l'abaque de Casagrande. 40
Figure III.13 : Schéma de principe de l'essai de Proctor.....41:
Figure III.14 : Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche.....42
Figure III.15: Matériel de l'essai Proctor 42
Figure III.16: Courbe Proctor modifié.....43
Figure III 17 : La machine de cisaillement.....44
Figure III 18 : Matériel de l'essai de cisaillement.....45
Figure III.19 : contrainte de cisaillement en fonction des déformations.....46
Figure III.20 : Courbe contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale.....46
Figure III.21 : Les copeaux de bois (Source auteures).....47
Figure III.22 : Courbe de granulométrie des copeaux de bois (Guermiti et al 2024).....47

CHAPITRE IV : Etude expérimentale de mélange (sol fin + copeau de bois)

Figure IV.1 : Préparation des mélanges (sol + copeaux de bois). 50
Figure IV.2 : Les limites d'Atterberg en fonction de teneur en copeaux de bois. 51
Figure IV.3: Courbe de Proctor modifié (Argile + 0% copeaux de bois) 52
Figure IV.4: Courbe de Proctor modifié (Argile + 2% copeaux de bois) 52
Figure IV.5: Courbe de Proctor modifié (Argile + 4% copeaux de bois) 52
Figure IV.6: Courbe de Proctor modifié (Argile + 6% copeaux de bois) 53
Figure IV.7: Courbe de Proctor modifié (Argile + 8% copeaux de bois). 53
Figure IV.8: Variation de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage des copeaux de bois ajouté.....53
Figure IV.9: V Variation de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage des copeaux de bois ajouté.....54
Figure IV.10 : Comparaison entre les courbes de compactage de Proctor modifié des mélanges étudiés.....54

Figure IV.11: Courbe contrainte de cisaillement-déformation
(Argile + 0 % Copeaux de bois) 55
Figure IV.12: Courbe intrinsèque de l'essai de cisaillement 56
(Argile+0 % Copeaux de bois). 56
Figure IV.13: Courbe contrainte de cisaillement-déformation 56
(Argile+2 % Copeaux de bois). 56
Figure IV.14: Courbe intrinsèque de l'essai de cisaillement 57
(Argile+2 % Copeaux de bois). 57
Figure IV.15: Courbe contrainte de cisaillement-déformation 57
(Argile+4 % Copeaux de bois). 57
Figure IV.16: Courbe intrinsèque de l'essai de cisaillement 58
(Argile+4 % Copeaux de bois). 58
Figure IV.17: Courbe contrainte de cisaillement-déformation 58
(Argile+6 % Copeaux de bois). 58
Figure IV.18: Courbe intrinsèque de l'essai de cisaillement 59
(Argile+6 % Copeaux de bois). 59
Figure IV.19: Courbe contrainte de cisaillement-déformation 59
(Argile+8 % Copeaux de bois). 59
Figure IV.20: Courbe intrinsèque de l'essai de cisaillement 60
(Argile+8% Copeaux de bois). 60
Figure IV.21 : Effet de l'ajout des Copeaux de bois sur l'angle de frottement 60
Interne de l'argile 60
Figure IV.22 : Effet de l'ajout des Copeaux de bois sur la cohésion de l'argile. 61

Liste des tableaux

Chapitre I: Généralités sur les sols fins

Tableau I.1 : Occurrence des minéraux argileux dans les sols en fonction du climat (Armines, 2006)**.**.....7

Tableau I.2 : Schéma simplifié montrant la classification des principaux de minéraux argileux et de leurs espèces (Jasmund ; Lagaly, 1992).....10

Tableau I.3 : Caractéristiques de la structure des principaux minéraux argileux (Bekhouche, 2019). 14

Tableau I .4 : Les différents types d'argiles et leurs caractéristiques 15

Tableau I.5 : Capacité d'échange cationique (CEC) de quelques minéraux. (Lepluart, 2002 ; Cabane ,2004).....17

Tableau I.6 : Surface spécifique et C.E.C. de quelques minéraux argileux, d'après (Lepluart, 2002 cité par Belabbaci, 2014) 17

Tableau I.7 : Caractéristiques microscopiques des principales argiles (Mrad, 2005)…….18

Chapitre III : Présentation des matériaux d'étude

Tableau III.1: Les coordonnées de site de marne. 30

Tableau III.2 : Les différents essais effectués. 32

Tableau III.3 : Résultat de la valeur du bleu de méthylène. 33

Tableau III.4 : Qualificatif l'activité de la fraction argileuse selon le coefficient VBS. 33

Tableau III.5 : Les résultats des analyses granulométriques par sédimentation……35

Tableau III.6 : Résultats de limite de liquidité 36

Tableau III.7 : Résultats de limite de plasticité. 39

Tableau III.8 : Degré de plasticité des sols.....39

Tableau III.9 : Etat du sol en fonction de l'indice de consistance.....40

(J.M. TCHOUANINANA(1999)) 40

Tableau III.10 : Résultat des limites d'Atterberg.....40

Tableau III.11 : Les résultats de l'essai Proctor modifié.....43

CHAPITRE IV : Etude expérimentale de mélange (sol fin + copeau de bois)

Tableau IV.1 : Résultats de l'essai limite d'Atterberg. 50

Tableau IV.2 : Influence de teneur en copeaux de bois sur les paramètres de compactage ... 51

Tableau IV.3 : Résultats la cohésion et l'angle de frottement des mélanges étudiés 55

Introduction générale

Introduction générale

La stabilisation des sols fins constitue l'une des missions principales des ingénieurs géotechniciens. Cette tâche implique l'application de techniques variées pour en améliorer les propriétés physiques et mécaniques, et ainsi garantir la sécurité et la durabilité des infrastructures construites sur ces sols.

L'amélioration des propriétés du sol, appelée aussi traitement ou stabilisation des sols, est une technique introduite depuis de nombreuses années avec le but principal de rendre les sols capables de satisfaire les sols argileux. Ce traitement est souvent opéré pour augmenter la résistance, pour diminuer la compressibilité et minimiser la sensibilité du sol fin aux variations de la teneur en eau. Pour ce fait, il faut utiliser d'autre matériau d'extérieur pour améliorer la performance géotechnique de site.

Plusieurs études ont été effectuées sur les phénomènes liées à ce genre de sol. Il existe différentes techniques du traitement des sols qui varient selon leur caractère, parmi elles, le traitement des sols par l'ajout du sable **(Bensaada et al 2023 ; Boukhatem et al 2021 ; Prabier et al 2016)**, par l'ajoute de fibre de caoutchouc **(Bkhiti et al 2012)**. Ainsi par des matériaux naturels, fabriqués et des sous-produits **(Akbulut et al 2007 ; Zouhair et al 2014)**. Aussi les pneus usagés, les cendres et les boues d'épuration ont montré un bon potentiel pour la stabilisation des sols (**Prabier et al 2016**).

L'objectif principal de cette mémoire vise à évaluer l'effet de l'ajout des copeaux de bois sur le comportement mécanique d'une argile. Notre mémoire est organisé en quatre chapitres :

- **Chapitre 1:**intitulé «Généralités sur les sols fins » est consacré à la présentation des principaux types des sols fins, et de leurs caractéristiques ;
- **Chapitre 2:** Revue des différentes techniques d'amélioration des sols ;
- **Chapitre 3:** Description des protocoles expérimentaux, identification et caractérisation des matériaux étudiés ;
- **Chapitre 4:** Analyse des résultats expérimentaux et évaluation de l'effet des copeaux de bois sur les propriétés mécaniques de l'argile.

Le mémoire se termine par une conclusion générale synthétisant les principaux résultats obtenus.

Chapitre I:

Généralités sur les sols fins

Chapitre I : Généralités sur les sols fins

I.1. Introduction

Les sols fins, tel que les argiles, les limons, les marnes et les sables fins, présentent des caractéristiques géotechniques complexes qui peuvent causer des dommages aux structures si elles ne sont pas prises en compte correctement lors de la conception des études de sol surtout ceux qui vont être utilisés pour la construction des ouvrages en terre. L'étude poussée des sols fins implique une analyse microscopique détaillée de leur minéralogie, de leur composition chimique et de leurs propriétés physiques **(Dubois, J., 2019).**

Il est également important de comprendre la structure et la texture de ces sols à fins de mieux comprendre leur comportement sous différentes contraintes et dans des différentes situations. Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les différentes caractéristiques et propriétés des sols fins, en mettant l'accent sur les argiles et leur complexité géotechnique , ainsi que des comportements des sols argileux, y compris le gonflement et le retrait, en nous concentrant plus particulièrement sur le mécanisme de gonflement, le tassement et le glissement.

I.2. Définition des sols fins

Ce sont des sols où les éléments fins de diamètre inférieur à 20µm prédominent. Les sols fins peuvent englober différents types tel que les argiles, les sables fins, les limons…etc. ÓÓEn général. Leurs propriétés doivent être étudiés avec précaution lors de la construction, afin d'éviter tout dommage de la structure car, ces sols sont très sensibles à toute variation en teneur en eau, ils peuvent augmenter ou diminuer de volume en fonction de leur état d'humidité ou de sécheresse **(Aoun, 2016 ; Nardjas D. et Fadila N., 2016)**.

I.3. Composition minéralogique des sols fins

Les sols sont généralement le résidu de l'altération de différents types de substrats rocheux ou meubles, leur composition minéralogique dépend donc directement de celle de la roche mère.

Cependant, l'altération peut modifier cette composition. Les particules solides des sols sont composées de divers minéraux. Ils sont souvent classés en quatre catégories (minéraux primaires, minéraux secondaires, sels et matières organiques) suivant leur composition, leur mode de formation et leur cause de formation **(xiang-lingLI, 1999).**

I.3.1. Les minéraux primaires

Ce sont les minéraux résiduels qui ont échappé à l'altération parce qu'ils sont stables (ils conservent alors la signature minéralogique et géochimique des matériaux parents) ou instables (n'ayant pas subi suffisamment leseffets de l'altération). Par exemple, le quartz, les feldspaths et les micas, qui se retrouvent dans diverses fractions granulométriques, sont les minéraux primaires les plus abondants dans les sols. Ils peuvent résulter d'une simple érosion des substrats avec tris granulométriques au cours du transport, surtout par l'eau, et au cours de la sédimentation. Cette catégorie de minéraux se retrouve souvent dans les sols granuleux : sables grossiers, graviers, etc**.**

I.3.2. Les minéraux secondaires

Ils résultent de la transformation (ou dégradation) géochimique et impliquent donc un changement de statut minéralogique aux dépens des minéraux primaires, accompagné d'une réduction de taille. Ils comprennent divers types de minéraux argileux (simples ou interstratifiés) ainsi que des hydroxydes ou oxydes généralement de Fe, parfois de Mn ou d'Al. Les minéraux argileux se cantonnent dans une gamme granulométrique comprise entre le micron et quatre microns. Mais tous les produits de l'altération peuvent ne pas être cristallisés ou cristallins. Les éléments chimiques qui les caractérisent ne sont pas strictement organisés bien qu'incorporant Si, Al et de l'eau. Ce sont les matières amorphes ou allophanes. Etant donné qu'ils sont les constituants principaux des sols fins, sujet principal de cette thèse, nous les présentons plus en détail ci-après**.**

I.3.3. Les sels solubles

Les solutions qui résultent de l'altération par hydrolyse transportent des éléments chimiques actifs tels que K, Na, Ca, Mg. Soit ces éléments quittent définitivement les sites de l'altération, soit ils y demeurent en constituant des phases minérales neuves (carbonates, sulfates, sels). Les carbonates peuvent jouer un rôle de ciment temporaire ou définitif scellant les minéraux argileux. K et Na peuvent aussi subsister dans ou à proximité des minéraux argileux. Par conséquent, ces sels peuvent influencer fortement le comportement hydromécanique des sols.**(xiang-lingLI, 1999).**

I.3.4. Les matières organiques

Elles résultent de la transformation hydrolytique ou biologique des résidus végétaux à la surface des sols. Ces résidus peuvent être réincorporés plus bas dans le matériau argileux du sol. La matière organique, à raison de quelques pour-cent, peut être présente dans les sédiments. Elle se caractérise par une forte capacité de rétention d'eau et par là agit

sensiblement sur le comportement géo-mécanique d'un matériau argileux. **(Xiang-lingLI, 1999).**

I.4. Microstructure des sols fins

La microstructure des sols fins est influencée par de nombreux facteurs. Tout d'abord, l'acidité du sol peut affecter la charge électrique des particules, ce qui peut influencer la formation de la microstructure. La vitesse de dépôt peut également jouer un rôle important dans la formation de la microstructure, car elle peut affecter l'organisation des particules et leur arrangement**.**

La minéralogie des sols peut également influencer la microstructure, car différents minéraux ont des propriétés chimiques et physiques différentes qui peuvent affecter leuragglomération et leur organisation. L'état d'agitation de l'eau peut également jouer un rôle important, car elle peut affecter la distribution et l'orientation des particules.

La quantité de matière organique peut également avoir un effet significatif sur la microstructure des sols fins. Les particules organiques peuvent se lier aux particules minérales pour former des agrégats plus gros, qui peuvent ensuite s'organiser en structures plus complexes**.**

Les dimensions et les formes des particules peuvent également influencer la microstructure des sols fins, car elles peuvent affecter leur arrangement et leur organisation. De même, les caractéristiques et les charges électriques des ions échangeables peuvent jouer un rôle important, car elles peuvent influencer les interactions entre les particules.

Enfin, l'histoire des sollicitations, telles que le séchage, le mouillage, les charges mécaniques, etc., ainsi que le mode de dépôt et les caractéristiques électrochimiques de l'électrolyte au moment du dépôt du sol peuvent également influencer la microstructure des sols fins. Tous ces facteurs peuvent contribuer à la formation de la microstructure des sols fins, qui peut avoir des implications importantes pour les propriétés géotechniques et environnementales des sols **(Ferber, V.2005).**

I.5. La structure des sols fins

La structure des sols fins : se réfère à la manière dont les particules du sol sont arrangées les unes par rapport aux autres. Elle est définie comme le mode d'assemblage des particules du sol en agrégats ou en blocs, ainsi que la manière dont ces agrégats sont liés entre eux **(Ammeri, A., et al 2008).**

I.5.1. La structure compacte

Dans ce cas, le sol est caractérisé par une forte densité et une faible porosité, ce qui rend le sol imperméable à l'air et à l'eau. Cette structure se forme souvent lorsque les particules de sable sont noyées dans une masse d'argile**.**

I.5.2. La structure particulaire

Pour cette structure, le sol se caractérise par des particules de tailles variables sans aucune liaison entre elles. Cette structure est souvent formée par des particules de sable, qui sont très grosses, ou de limon, qui sont plus petites que le sable, mais plus grandes que les particules d'argile **(Amerri, A., et al 2008).**

I.6. La texture des sols fins

La texture des sols fins est déterminée par la proportion des particules minérales de différentes tailles qui composent le sol. Les particules sont classées en argiles (<2µm), limons fins (2-50 µm) et sables fins (50-2000µm), **(Atlan, Y., &Feller, C. 1980).**

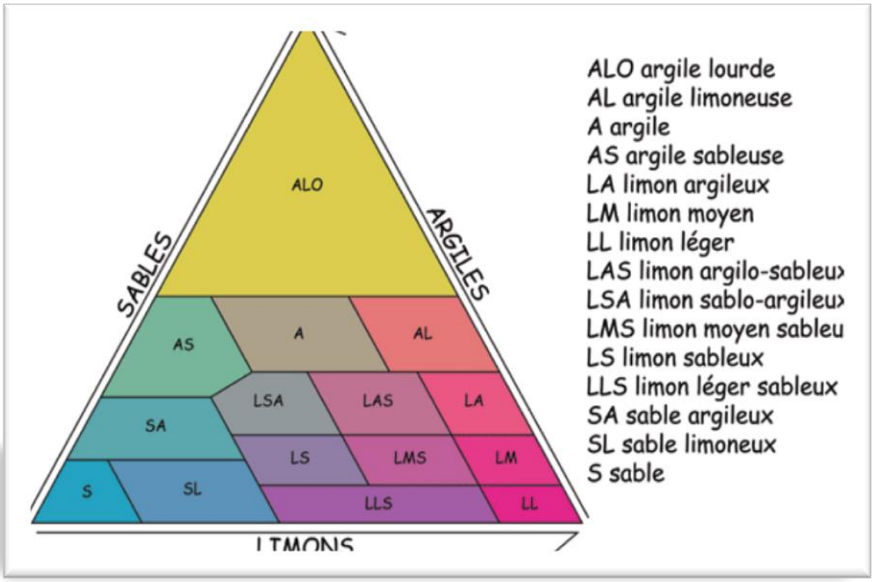


Figure I.1 : Triangle de texture **(Maëva Bourgeois, 1992).**

I.7. Différents types de sols fins

Les sols fins sont les matériaux dans lesquels les particules de nature argileuse occupent une place prédominante. Cependant, lorsque les particules argileuses sont supérieure à 30%, et les particules grossières sont inférieures à 10%, le matériau est classé comme étant un sol fin. Les sols à grains fins regroupent évidemment tous les sols dont les particules sont invisibles à l'œil nu, suivant la classification des sols par granulométrie, le vocable sols fins désigne en général les argiles, les limons, les marnes…

I.7.1.Les argiles

I.7.1.1. Définition des argiles

L'argile se rapporte à la terre grasse et molle contenant un ensemble de particules fines dont la taille supérieure est fixée à 2µm. Chargée négativement comme la smectite, l''illite et la kaolinite. La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques. Les argiles sont très abondantes dans la nature et couvrent environ 42 % du volume de l'écorce terrestre **(Wakim, 2005).**

A l'heure actuelle, les argiles sont des minéraux dont les domaines d'applications sont multiples (l'industrie pharmaceutique, la poterie, la céramique industriel.) et qui en fait l'une des « matières premières » couramment utilisée par L'homme due à certaines caractéristiques comme : l'abondance dans la nature, la grande surface spécifique et la capacité d'échange cationique.

Les agiles peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Les argiles plastiques : elles sont tendres et très déformables ;
- Les argiles raides : elles sont indurées et présentent un comportement plus fragile que ductile au-delà de la limite d'élasticité, et cela à cause de la présence des carbonates et du quartz.

I.7.1.2. Formation des minéraux argileux

Les sols argileux se forment par un processus lent d'altération sous l'action du climat, suivi de phénomènes « érosion, de transport et de sédimentation. 90 % des minéraux argileux sont d'origine détritique, l'altération peut être physique (désagrégation des minéraux primaires) ou chimique par transformation des minéraux). Certains minéraux argileux précipitent à partir d'une solution (minéraux néoformés).

Il existe donc trois processus de formation des minéraux argileux

I.7.1.2.1. Héritage et altération

L'une des origines des minéraux argileux est liée à l'altération physique des roches, en fonction des roches mères et du climat, les minéraux argileux résultant seront différents. En climat froid, l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche (illite et chlorite), ils sont hérités de la roche d'origine. En climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée et donne de la kaolinite en milieu drainé et des smectites en milieu confiné. En climat tempéré et humide, l'altération est modérée, il apparaît des inters stratifiés, des illites, des chlorites dégradées et des vermiculites **(Belabbaci, 2014).**

I.7.1.2.2. Transformation des minéraux argileux par dégradation et aggradation

La transformation des minéraux argileux consiste en une modification du minéral argileux tout en conservant son type de structure. On distingue les transformations par dégradation (sous traction d'ions) et par aggradation (fixation d'ions supplémentaires). Ces transformations ont lieu aussi bien au cours de l'altération que pendant la sédimentation et la diagenèse**.**

I.7.1.2.3.Contexte de formation des sols argileux

La sédimentation océanique argileuse est directement liée au type d'altération régnant sur les continents voisins et dépend donc de la latitude et de la nature de la roche mère, mais aussi de l'éloignement des sources ainsi que des conditions physico-chimiques régnant dans la zone de sédimentation **(Belabbaci, 2014).**

Tableau I.1 : Occurrence des minéraux argileux dans les sols en fonction du climat **(Armines, 2006).**

Climat	Origine des argiles	Minéraux fréquents
Glaciaire	Héritage	Illite, chlorite, ….
Boréal tempéré	Héritage, transformation	Vermiculite, interstratifiés, illite, Chlorite, smectites, …
Méditerranéen Subtropical	Héritage, transformation, Néoformation	Smectites, …
Desertique	Héritage	Illite, chlorite, …
Equatorial	Néoformation	Gibbsite, kaolinite…

La nature minéralogique des argiles dépend aussi de la roche mère :

- La kaolinite provient de l'altération des roches magmatiques grenues et acides (feldspaths principalement) ;
- L'illite de l'altération des roches magmatiques et métamorphiques ;
- Les smectites de l'altération des roches volcaniques ;
- Les attapulgites et sépiolites (argiles fibreuses) sont associés à des dépôts lagunaires.

Ces différentes familles d'argile, associées à d'autres minéraux d'origine détritique (quartz essentiellement) et/ou chimique (calcite, dolomite essentiellement) et à des minéraux accessoires sont les constituants principaux des sols argileux. Leurs caractéristiques mécaniques et géotechniques sont directement liées à la nature des minéraux argileux et aux transformations dia-genétiques subies par la suite.

Les marnes sont des matériaux d'origine chimique, biochimique ou détritiques dont la quantité en carbonates est comprise entre 35 et 65 %. Le terme d'argile calcaire est utilisé pour un pourcentage en carbonates compris entre 5 et 35 % **(Belabbaci, 2014).**

I.7.1.3.Minéralogie et structure des minéraux argileux

I.7.1.3.1. Minéralogie des argiles

Les argiles sont les produits de décomposition des roches siliceuses par désagrégation physique et mécanique puis par altération chimique. La famille des minéraux argileux regroupe tous les silicates hydratés appartenant au groupe des phyllosilicates. Les minéraux argileux sont assimilés à des colloïdes, ce qui signifie qu'ils sont capables de fixer facilement de grandes quantités de phase liquide continue **(Caillère et al, 1982).**

I.7.1.3.2. Structure des minéraux argileux

Chaque minéral argileux est formé par l'empilement de cristaux microscopiques, qui portent habituellement le nom de couche en raison de leur apparence similaire à celle d'une lamelle ou d'une couche extrêmement mince. Ces couches sont eux –mêmes constituées d'unités cristallines que l'on appelle structures fondamentales. Celle-ci se juxtapose dans un seul plan, et c'est pourquoi les couches ont une surface très grande par rapport à l'épaisseur. On évalue l'épaisseur des couches et des structures fondamentales à environ 0.5 nm (5*10-7mm)**.**

Les chercheurs ont observé qu'il n'existait que deux structures fondamentales

- Les structures fondamentales tétraédriques ;
- Les structures fondamentales octaédriques.

I.7.1.3.2.1. Structures octaédriques

L'octaèdre d'alumine est constitué de 6 hydroxyles entourant un atome d'aluminium ou de magnésium équidistant de chacun d'eux. Ces octaèdres se combinent entre eux pour former une couche plane. Ces derniers sont entourés par des groupements hydroxyles (OH^-) comme il est montré dans la **(figure I.2).**

Les unités octaédriques sont liées ensemble de telle sorte que chaque groupement fonctionnel (OH^-) est partagé entre 3 unités octaédriques. La formule générale de ce groupement est n [Al2(OH) 6] ou n [(Mg3(OH)6] **(Bekhouche, 2019).**

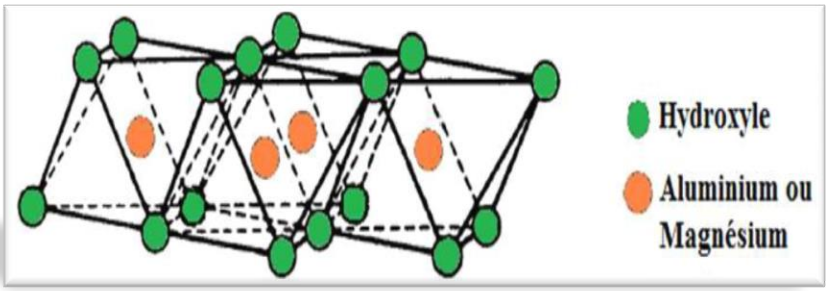


Figure I.2 : Structure d'une couche à base d'octaèdre **(Grim, 1962)**

I.7.1.3.2.2.Structures tétraédriques

Le tétraèdre de silice est formé de 4 atomes d'oxygène entourant un atome de silicium équidistant de chacun d'eux. Ces tétraèdres se combinent selon un arrangement plan hexagonal, les atomes d'oxygènes étant dans un même plan et chacun d'eux étant commun à deux tétraèdres. Un des atomes d'oxygène possède une valence libre et peut être mis en commun avec un autre feuillet. Les tétraèdres sont liés ensemble par leurs bases en partageant union d'oxygène entre deux tétraèdres pour former une couche tétraédrique **(figure I.3).** La formule générale de cet ensemble est n $[(Si_2O_5)^{2-}]$ **(Bekhouche, H, 2019).**

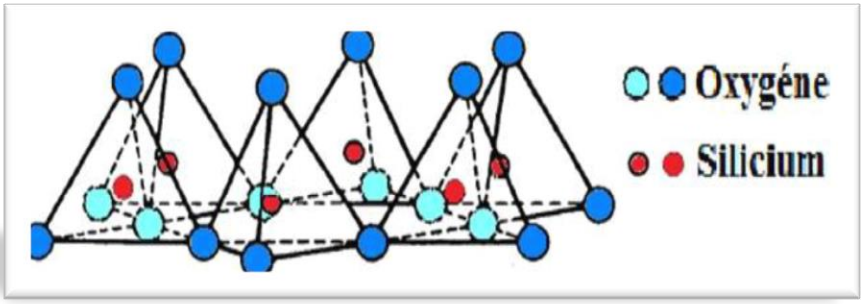


Figure I.3 : Schéma d'une couche de tétraèdre avec arrangement hexagonal **(Holtzetal, 1991).**

I.7.1.4.Classification des minéraux argileux

Différentes classifications des phyllosilicates ont été proposées. La première, établie par l'AIPEA (Association Internationale Pour l'Etude des Argiles, 1966-1972), se base uniquement sur la charge du feuillet et sur le nombre d'atomes métalliques en couche octaédrique. La deuxième, établie par Mering et Pedro (1969) prend en compte la localisation des substituants, leurs distributions et le type des cations compensateurs. La classification la plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. On distingue ainsi 4 groupes:

Minéraux à 7 Å : Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T : O ou de type 1 :1. Son épaisseur est d'environ 7 Å.

Minéraux à 10 Å : Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche Octaédrique. Il est qualifié de T : O : T ou de type 2 :1. Son épaisseur est d'environ 10 Å.

Minéraux à 14 Å : Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T : O : T et de couches octaédriques interfoliaires.

Minéraux interstratifiés : L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus.

Les groupes d'argiles les plus importants sont les kaolinites, les illites, les chlorites, les smectites et les vermiculites **(El Ouahabi, 2013)**

Tableau I.2 : Schéma simplifié montrant la classification des principaux de minéraux argileux et de leurs espèces **(Jasmund ; Lagaly, 1992).**

Groupe de minéraux argileux	Espèce minérale	Structure
Kaolinites	Kaolinite, Halloysite, Diskite	Minéraux à deux couches T-O T-O
Smectites	Montmorillonite, Saponite, Beidellite, Nontronite.	Minéraux à trois couches T-O-T T-O-T
Illites, Vermiculites, Micas.	Illite, Vermiculite, Muscovite , Biotite.	H2O cations
Chlorites	Chlorite	Minéraux à quatre couches T-O-T-O T-O-T-O
Sépiolites, Palygorskites.	Sépiolite, (écume de mer), Attapulgite.	Minéraux en lattes T-O-T T-O-T T-O-T

I.7.1.5.Différents types des minéraux argileux

Les particules d'argile sont des mélanges de particules élémentaires de nature, de taille, de forme et de propriétés de surface variables. Le terme "particule élémentaire" fait référence au produit de la transformation physique ou chimique des roches en minéraux isolés ou fragments de minéraux, monocristaux ou assemblages amorphes.

Les particules de base peuvent être subdivisées en différents minéraux : kaolinite, illite, montmorillonite, etc. Les types d'argiles les plus courants sont : la kaolinite, la montmorillonite et l'illite **(Figure I.4)**. Ces différents types d'argile se comportent différemment vis-à-vis de l'eau.

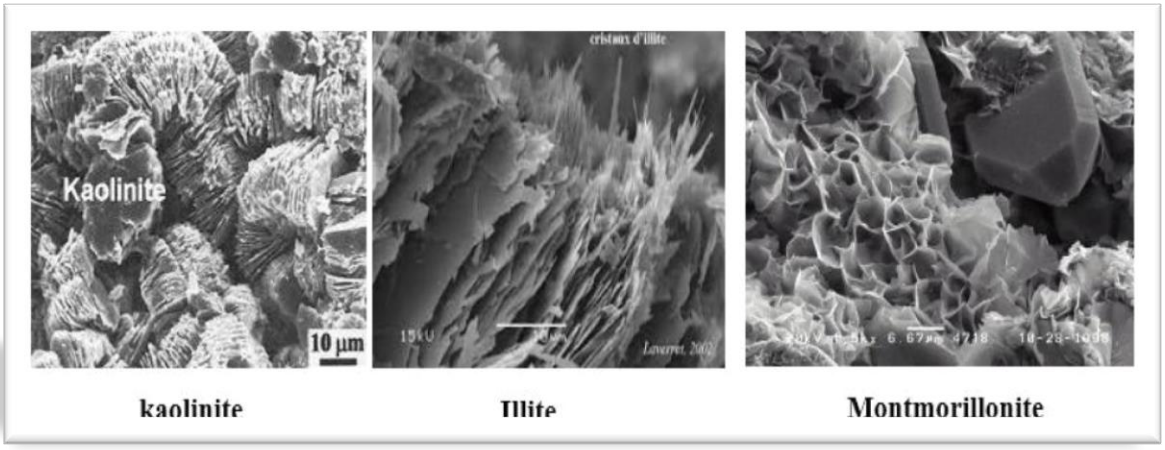
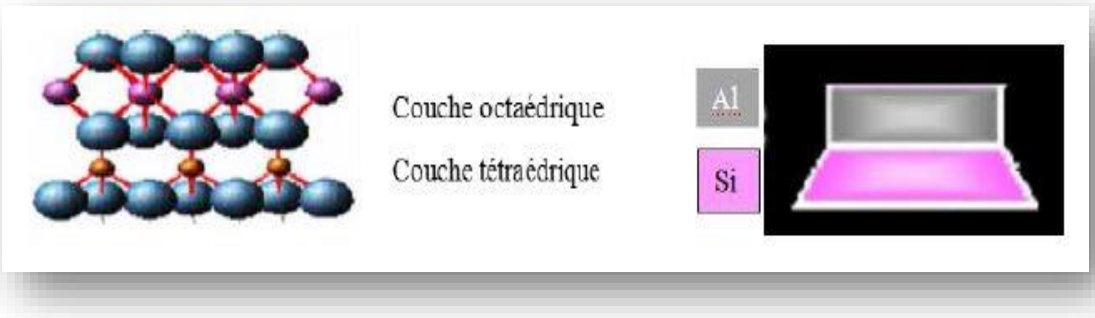


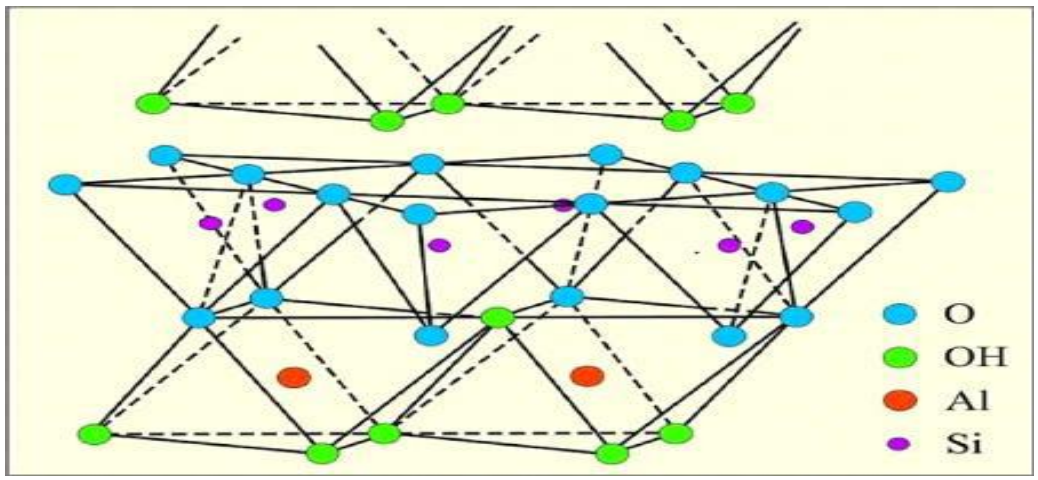
Figure I.4 : Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles **(Mitchell, 1976).**

I.7.1.5.1. Kaolinite

Chaque feuillet de cette famille résulte de l'assemblage d'un feuillet tétraédrique SiO4 avec un feuillet octaédrique AlO2(OH) 4**(Figure I.5)**. Les argiles de cette famille sont dites argiles T-OLes couches de base successives sont maintenues par les liens d'hydrogène entre les hydroxydes du feuillet en octaèdre et les atomes d'oxygène du feuillet en tétraèdre. Ces liaisons considérées comme très forte, empêchent l'hydratation entre les feuillets élémentaires permettant un empilement relativement important de couches et la formation d'un cristal d'assez grande dimension. L'espace inter-foliaire de cette famille est de 7.2 Å. La kaolinite est une argile stable, non-gonflante et sa structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau et ne peut être détruite que par chauffage à 450°C. La formule générale d'un feuillet de kaolinite est donnée par la formule suivante **(Hafsi, 1993).**



A. Schéma de la structure élémentaire de la kaolinite (Lambe (1953)).



B. Structure élémentaire du réseau cristallin de kaolinite

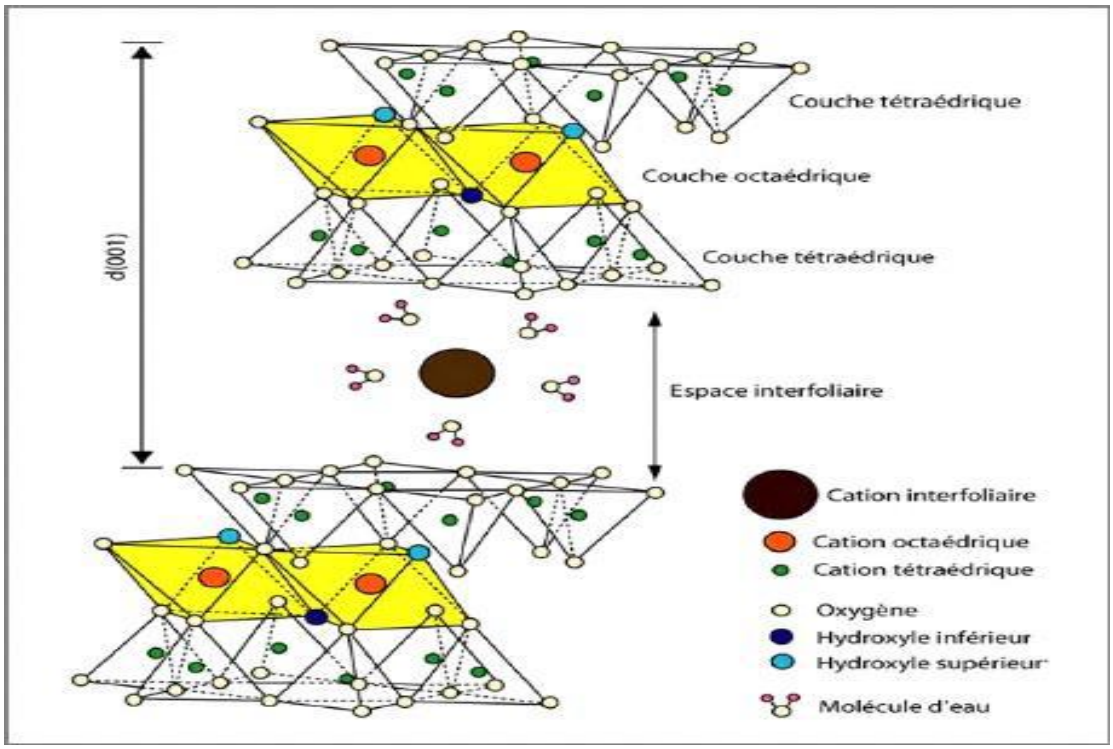
Figure I.5: Schéma de la particule de kaolinite. **(JASMUND et LAGALY, 1992).**

I.7.1.5.2. Montmorillonite (Smectites)

Ces minéraux sont également formés de feuillets à trois couches et sont des argiles T-O-T L'épaisseur d'un feuillet est de 10A°, il est constitué par l'association de deux couches tétraédriques de type TO4(OH) 2. T pouvant être AL3+, Fe3+, Mg2+, K+… **(Figure I.6).** La formule générale de la montmorillonite est la suivante n [(Al1.67 Mg0.33) Si4O10 (OH) 2]. Les liaisons d'un feuillet à l'autre sont faibles et l'eau pénètre facilement entre les feuillets. Pour cette raison, les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches. La faiblesse de ces liaisons leur confère de grandes surfaces spécifiques et de forts potentiels de gonflement. L'argile contenant un fort pourcentage de montmorillonite est considérée comme une argile de nature gonflante. **(Hafsi, 1993).**



A. Schéma de la structure élémentaire de la montmorillonite (Lambe, 1953)



B. Structure élémentaire du réseau cristallin de la montmorillonite

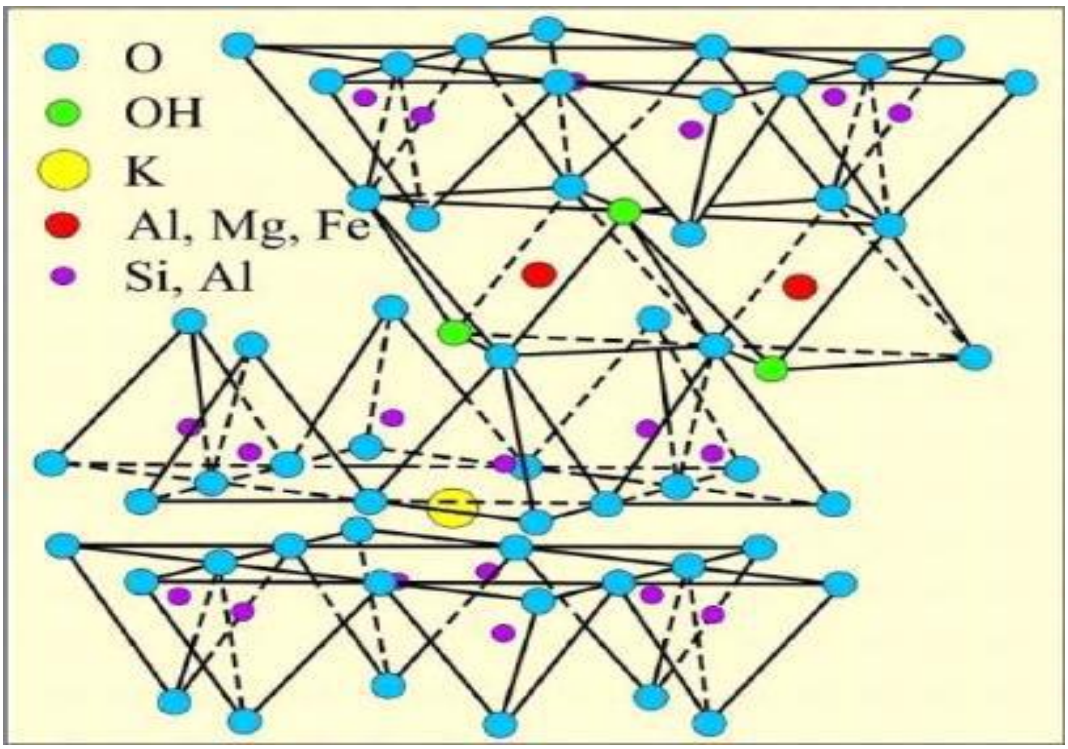
Figure I.6 : Structure de Famille de la montmorillonite. **Low, (1973) ; Chen (1975) ; Filliat et al. (1981) ; Katti (1988)**

I.7.1.5.3. L'illite

Ces argiles sont donc aussi appelées argiles **T-O-T**. La structure de l'illite est analogue à celle de la montmorillonite, mais la présence d'ions potassium K^+ dans la structure **(figure I.7)** rééquilibre et renforce la liaison entre les feuilles, rendant ainsi l'argile moins sensible aux phénomènes de retrait-gonflement. L'illite a un comportement intermédiaire (les latérites font partie de cette famille d'argile) **(Hafsi, 1993).**



A. Schéma de la structure élémentaire de l'illite Lambe (1953)



A. Structure élémentaire du réseau cristallin de l'illite

Figure I.7 : Structure de famille de l'illite. **(Jasmund et Lagaly, 1992)**

Tableau I.3 : Caractéristiques de la structure des principaux minéraux argileux **(Bekhouche, 2019).**

Minéraux argileux	Type et qualité des liens entre les couches élémentaires	Substitutions isomorphes	Activité électrochimique	Gonflements
Illite	Liens assurés par des atomes de potassium (k) moins forts que ceux de la kaolinite, mais plus que ceux de la montmorillonite	Plus nombreuses que celles de la kaolinite, mais moins nombreuses que celles de la montmorillonite	Supérieure à celle de la kaolinite, mais inférieure à celle de la montmorillonite	Faibles à moyens
Kaolinite	Liens d'hydrogènes parmi les plus forts chez les minéraux argileux	Peu nombreuses	Une des plus faibles chez les minéraux argileux	Assez faibles
Montmorillonite	Liens assurés par des molécules d'eau, parmi les plus faibles chez les minéraux argileux	Très nombreuses	Une des plus fortes chez les minéraux argileux	Importants

I.7.1.5.4. Bentonite

La bentonite est une argile colloïdale dont le nom vient de Fort Benton dans le Wyoming aux États-Unis. Connue aussi sous le terme de « terre à foulon », elle peut être considérée comme une smectites, essentiellement constituée de montmorillonite (Na, Ca) 0.33 (Al, Mg) 2 (OH) (80%), ce qui explique sa capacité de rétention d'eau.

I.7.1.5.5. Chlorite

Les chlorites (du grec chlore « vert-jaune pâle ou jaune clair », couleur du chlore à l'état gazeux). Ce sont les argiles vertes pour des emplois médicaux divers. Les feuillets sont étroitement reliés les uns aux autres par des groupements hydratés de magnésium, d'aluminium et de fer. L'espace inter foliaire atteint 14 Å.

I.7.1.5.6. Vermiculite

Les vermiculites tirent leur nom de leur aspect de petits vers, après chauffage (vermiculas, « Petit vers » en latin). L'eau contenue entre leurs feuillets peut être éliminée par chauffage à plus de 300°C. L'espace interfoliaire se réduit alors de 14 à 10 Å. Ce sont les argiles utilisées dans le bâtiment comme isolants**.**

Tableau I .4 : Les différents types d'argiles et leurs caractéristiques

Espèce minérale	Formule chimique	Nombres de couches	Taille de l'espace interfoliaire	Type
Kaolinite	$Si_2Al_2O_5(H_2O)_2$	Minéraux à 2 couches	7 Å	non gonflante
Illite	$KAl_2(OH)_2.(AlSi_3(O.OH)_{10})$	Minéraux à 3 couches	10 Å	non gonflante
Smectite ou montmorillonite	$Si_8Al_4O_{22}(H_2O)_2\ (H_2O)_n$	Minéraux à 3 couches	10 et 17,5 Å	gonflante
Bentonite	$(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2(H_2O)_n$	Minéraux à 3 couches		gonflante
Chlorite	$(Fe,Mg,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	Minéraux à 3 couches	14 Å	gonflante
Vermiculite	$(Mg,Ca)_{0,7}(Mg,Fe,Al)_6(Al,Si)_8O_{22}(OH)_4.8H_2O$	Minéraux à 2 couches	14 à 10 Å	gonflante

I.7.1.6. Principales caractéristiques des minéraux argileux

Les principales caractéristiques des minéraux argileux qui influencent le gonflement sont les suivantes :

I.7.1.6.1. Densité de charge spécifique

σ est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique, CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse:

$$\sigma\ (meq/m^2) = \frac{CEC}{S} \qquad (1)$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux :

- Une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (Al3+ pour Si4+ dans la couche tétraédrique ; Mg2+ ou Fe2+ pour Al3+ dans la couche octaédrique) ;
- Une charge de surface variable selon le PH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux.

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux. L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraine l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur.

Lefevbre et Lajudie, 1999, ont effectués des essais de gonflement libre pour différentes argiles de densité de charges différentes et ont montré une baisse du potentiel de gonflement avec l'augmentation de la densité de charge.

I.7.1.6.2. Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique joue un rôle important dans le phénomène de gonflement des minéraux argileux, car plus les feuillets possèdent des sites compensables, plus ils peuvent adsorber des ions. Cependant, lorsque la densité du site est trop élevée, comme pour la vermiculite, les feuillets sont liés par de trop fortes interactions pour pouvoir gonfler, et donc pour être échangés. La capacité de l'argile échangeuse de cations est mesurée en millilitres Équivalent pour 100 grammes d'argile et varie dans le même sens que la densité de charge surface. Par conséquent, pour les argiles avec des valeurs CEC élevées, elles ont tendance à avoir peu gonflé **(Belabbaci, 2014).**

Tableau I.5 : Capacité d'échange cationique (CEC) de quelques minéraux. (**Lepluart, 2002 ; Cabane ,2004)**

Minéraux	**CEC** (meq/100g)
Kaolinite	3-15
Illite	30-40
Montmorillonite	80-150

I.7.1.6.3.Surface spécifique

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

$$\text{surface spécifique} = \frac{\text{surface}}{\text{masse}} \quad \text{——————} \quad (2)$$

La surface spécifique est composée de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace inter foliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé. Les caractéristiques d'argiles sont résumées dans le **tableau I.6 (Robert Holtez et al, 1981).**

Tableau I.6 : 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

Les principales caractéristiques des trois types d'argiles sont résumées dans Le tableau suivant :

Tableau I.7 : Caractéristiques microscopiques des principales argiles **(Mrad, 2005).**

Argile	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
Type de feuillet (A°)	1 :1	2 :1	2 :1
Épaisseur de feuillet (A°)	7	10	9,6
Nombre de feuillet par particule	10-150	5-20	1-10 (montmorillonite sodique) 10-40 (montmorillonite calcique)
CEC (méq/100 g)	5-15	10-40	80-150
Surface spécifique (m^2 /g)	10-45	80-100	700-900
Matériau interfoliaire	--	K^+	H_2O, Na^+, Ca^{2+}, ...
Comportement dans l'eau	non-gonflant	Peu-gonflant	Gonflant

I.7.2.Définition des silts et des limons

Les silts et les limons sont deux types de sols qui se situent entre les sols sableux et les sols argileux en termes de granulométrie c'est-à-dire de diamètres compris entre 2 et 50 micromètres. Ils sont souvent associés à des matériaux organiques et peuvent contenir des minéraux de quartz, de feldspath, de calcite ou encore de mica (Selon la classification granulométrique de l'USDA (United States Département of Agriculture),

Les silts ont une capacité de rétention de l'eau relativement élevée. Vue leur grande compressibilité, ces types de sol constituent des assises souvent médiocres pour les constructions, ce qui les rend peu adaptés pour des fondations. Ils ont également une faible perméabilité.

Par rapport aux silts, les limons renferment une plus grande proportion de particules argileuses, ils ont une texture douce et veloutée au toucher et ont une capacité de rétention de l'eau élevée. Ils sont souvent riches en minéraux tels que la calcite, le quartz, le mica ou encore l'hématite. De même, les limons sont également peu adaptés pour des fondations à cause de leur faible portance et leur grande compressibilité



Figure I.8 : A : Limon en vue macroscopique **(Roy, 2015).**
B : Limon à l'échelle microscopique **(Stéphane Joly, 2011).**

I.7.3.Définition des sables fins

Les sables fins sont des particules de sable qui ont une granulométrie fine, généralement férieure à 0,063 mm de diamètre. Ils sont souvent le produit de l'érosion des roches et des minéraux, ainsi que de l'action des vagues et des courants marins qui les transportent et les déposent sur les plages **(Pierre, 2014)**

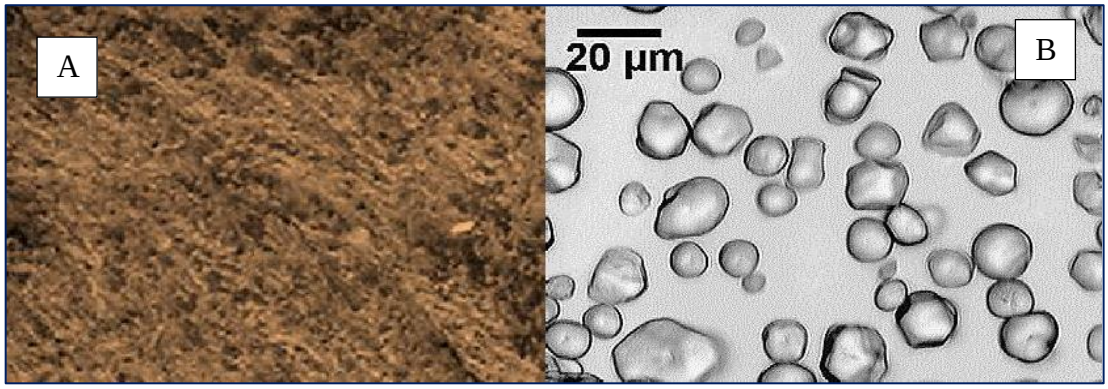


Figure I.9 :A : Sable fin à l'échelleMacroscopique **(Roy, 2015)**
B: Sable fin à l'échelle Microscopique **(Roy, 2015)**

I.8.Principaux problèmes des sols argileux

Dans de nombreux pays du monde, le gonflement est à l'origine de fréquents désordres des ouvrages légers. Aux Etats-Unis d'Amérique les dommages provoqués par le gonflement des sols présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles.

En Algérie l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, tassement, et de glissement.

I.8.1. Retrait - gonflement

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux 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 consécutive 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).

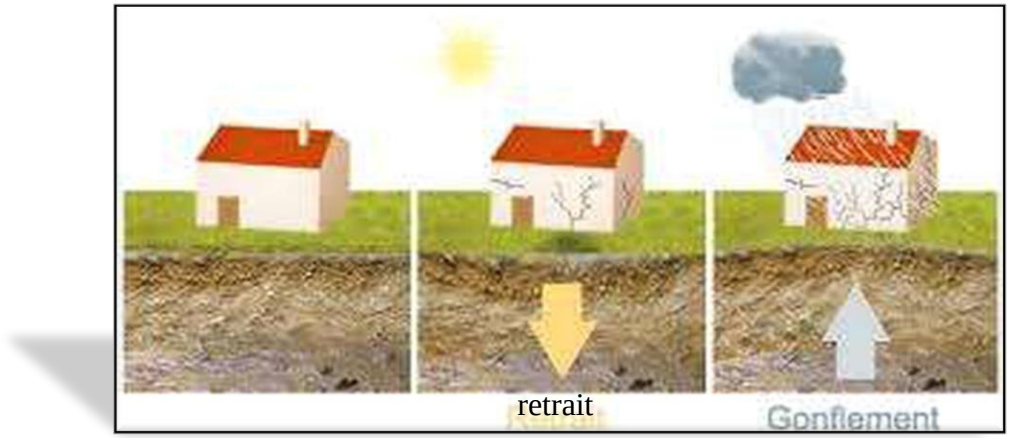


Figure I.10: le risque retrait-gonflement des argiles

I.8.2. Tassements

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation.

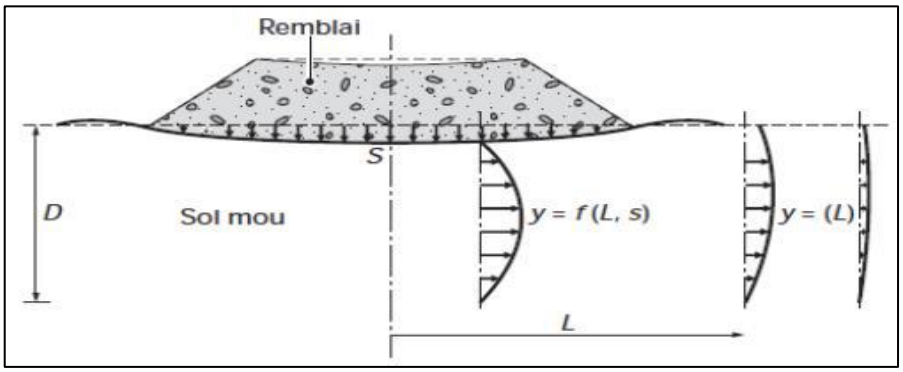


Figure I.11 : Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation.

I.8.3. Glissements

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites.

La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes diverses **(Bengaraa, H. (2004))**

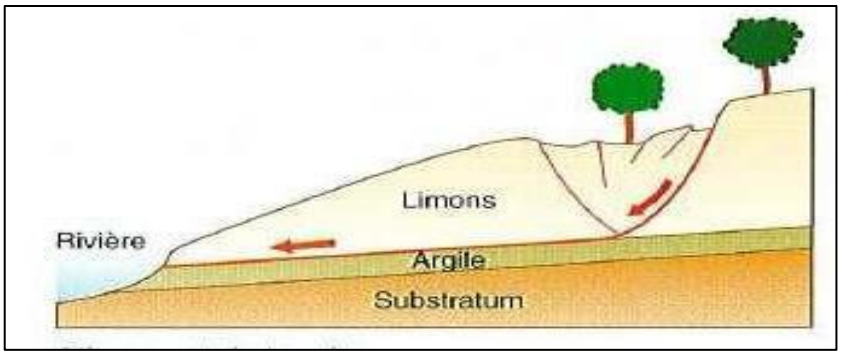


Figure I-12 : Glissement de terrain

I.8.4. Erosion des sols

L'érosion est un domaine important en génie civil qui prend en compte l'érosion des remblais d'infrastructures linéaires de transport comme les routes et les chemins de fer. Ce phénomène de dégradation et de transport des matériaux solides sont causés par l'eau. L'érosion se définit comme un déplacement de sol attribuable à l'action érosive de l'eau, qui entraîne un apport récurrent de sédiments, même en faible quantité, dans le réseau hydrographique situé sur ou en bordure immédiate des parterres de coupe ou du tronçon de route faisant l'objet de l'évaluation. Il doit être récurrent, c'est-à-dire qu'il doit se répéter dans le temps lors des averses de pluie ou de la fonte des neiges. Il peut être direct ou indirect, via le réseau routier ou le drainage naturel.



Figure I.13: l'érosion de sol

I.9. Conclusion

Les sols fins et l'argile en particulier présentent une faible capacité portante en plus des problèmes qu'ils engendrent tels que le gonflement et le tassement ce qui ne convient pas pour certains ouvrages de génie civil qui exigent une haute portance et une stabilité à long terme.

Pour remédier à ces problèmes des solutions existent, telles que :

- le remplacement du sol par un matériau adéquat.
- le changement du site de l'ouvrage.
- l'amélioration de la qualité du sol par traitement chimique ou par renforcement.

Les deux premières solutions présentent des inconvénients à la fois économique et environnemental. L'amélioration est donc la solution la plus adéquate car les répercussions sur l'environnement et l'économie du projet sont limitées.

Chapitre II :

Techniques de stabilisation des sols fins

Chapitre II : Techniques de stabilisation des sols fins

II.1. Introduction

Depuis quelques décennies, les sols argileux sont devenus un sujet d'intérêt des chercheurs et des ingénieurs géotechniciens, les dégâts engendrés par leur comportement sont énormes puisqu'ils se caractérisent par plusieurs propriétés qui les rendent complexe et ceci est dû principalement à leur structure minéralogique. De nombreuses techniques ont été développées par ces ingénieurs au cours du 20èmesiècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des sols. Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique regroupe et présente les travaux de recherche effectués dans le domaine de la stabilisation des sols.

II.2. Définition et but de la stabilisation des sols

II.2.1.Définition

Stabiliser un sol, au sens large du terme, consiste à modifier une des propriétés de ce sol en vue d'améliorer ces performances techniques

II.2.2.Principaux objectifs de la stabilisation

La stabilisation répond à un certain nombre d'objectifs qui sont **(Boutouche. S. 2017)**:

- Réduisait le volume des vides entre les particules solides (porosité) ;
- Colmater les vides qui ne peuvent être supprimés (perméabilité) ;
- Créer des liens ou améliorer les liaisons existant entre les particules (résistance mécanique).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer les caractéristiques du matériau et de :

- Obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques: augmenter la résistance à la compression simple à l'état sec, à l'état humide et la résistance à la traction et au cisaillement ;
- Obtenir une meilleure cohésion ;
- Réduire la porosité et les variations de volume : gonflement-retrait à l'eau ;
- Améliorer la résistance à l'érosion du vent et de la pluie : réduire l'abrasion de surface et imperméabiliser ;
- Réduire sa sensibilité à l'eau : gonflement et retrait. Il est entendu que les améliorations obtenues doivent avoir un caractère irréversible. **(Bouziane .R,2022)**

II.3.Différentes techniques de stabilisation

Dans la géotechnique, les procédés à utiliser pour stabiliser surtout les sols argileux sont nombreux. Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

- La stabilisation mécanique
- La stabilisation thermique
- La stabilisation physique
- La stabilisation chimique (par additifs).

II.3.1.Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique est une méthode utilisée pour renforcer les sols en modifiant leur structure physique et en améliorant leurs propriétés mécaniques. Cette approche vise à réduire la compressibilité des sols fins, à augmenter leur résistance à la compression et à améliorer leur capacité portante. La stabilisation mécanique est largement utilisée dans le domaine de la géotechnique pour assurer des fondations solides et durables**.**

II .3.1.1. La stabilisation mécanique par compactage

Est une méthode utilisée pour renforcer les sols fins en augmentant leur densité et en améliorant leur résistance mécanique. Elle implique l'application de forces mécaniques, généralement à l'aide de rouleaux compresseurs, pour réduire les vides et les espaces entre les particules du sol, ce qui améliore la compaction et la stabilité globale **(Bouhlassa chaith 2022).**

II .3.1.2. Le drainage

Est un processus visant à améliorer l'évacuation de l'eau à travers les sols fins, réduisant ainsi l'accumulation excessive d'eau et prévenant les problèmes liés à la saturation en eau. Il s'agit d'une technique utilisée pour renforcer les sols en éliminant l'excès d'eau, ce qui contribue à augmenter leur résistance et à prévenir les problèmes d'instabilité.

II .3.1.3. La technique de substitution

En géotechnique consiste à remplacer les sols fins instables par des matériaux granulaires plus stables, tels que du sable ou du gravier. Cette méthode vise à renforcer la structure du sol en remplaçant les particules fines qui ont une faible capacité portante ou des propriétés mécaniques défavorables par des matériaux granulaires plus résistants, Le remplacement des sols fins par des matériaux granulaires présente plusieurs avantages. Les matériaux granulaires ont généralement une meilleure capacité de drainage, une résistance mécanique plus élevée et une moindre sensibilité aux variations d'humidité par rapport aux sols fins. Par

conséquent, la substitution permet d'améliorer la stabilité du sol, sa capacité portante et sa résistance aux déformations excessives **(Braja. M. Das, Khaled S., 2022).**

II .3.1.4. L'application de fortes pressions

Est une technique utilisée pour améliorer la résistance et la capacité portante des sols fins. Cette méthode consiste à appliquer des pressions élevées sur le sol afin de favoriser sa densification et sa consolidation

L'application de fortes pressions peut être réalisée de différentes manières, notamment à l'aide de rouleaux vibrants, de presses hydrauliques ou de machines spéciales conçues pour exercer des charges élevées sur le sol. L'objectif principal de cette technique est d'augmenter la densité du sol, de réduire les vides entre les particules et de renforcer la structure globale du sol **(Bouhlassachaith 2022).**

II .3.1.5. Stabilisation par pré humidification

Il s'agit de créer ainsi un maximum de gonflement avant construction par une augmentation de teneur en eau du sol. Deux techniques ont été utilisé **(BOJANA Dolinar, 2006), cité par (Belabbaci, 2014) :**

- Simple arrosage par jet ;
- Création de bassins au-dessus du sol gonflant, et c'est beaucoup plus utilisé.
- Cette méthode est basée sur les hypothèses suivantes **(Mellal, 2009) :**
- Le sol permet un gonflement par humidification précédant la construction ;
- Le mouvement de gonflement soit stabilisé lors de la construction réalisant ainsi un état de non soulèvement. Il faut donc compter sur la permanence de la teneur en eau artificiellement créée.

II .3.2. La stabilisation thermique

Une augmentation de la température peut améliorer la résistance d'une argile en réduisant la répulsion électrique entre les particules, sous l'effet de la chaleur on provoque un écoulement de l'eau interstitielle due au gradient thermique appliqué. **(Belabbaci, 2014).**

II .3.3. Stabilisation physique

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, à 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.

- Ajout de fibres végétales à des terres argileuses. Cela renforce la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer au moment du retrait de l'argile lors du séchage **(FERHAT. I 2019).**

II .3.4. Stabilisation chimique

La stabilisation chimique modifie les caractéristiques de la terre à l'aide de certains ajouts. Afin d'augmenter les caractéristiques mécaniques et de diminuer la sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou de produits chimiques (Asphalte, Chlorure de Calcium ou de Sodium), rendant les sols traités moins hydrophiles. De nombreux stabilisants chimiques existent et apportent diverses améliorations à la terre selon leur propriété **(FERHAT. I 2019).**

II .3.4. 1. Stabilisation par les liants hydrauliques (Chaux, Ciment)

Ce sont des produits d'origine minérale qui par réaction avec l'eau donnent des réseaux cristallins enchevêtrés ayant une bonne cohésion et pouvant aboutir à des jonctions avec le Squelette minéral. Ils sont tous à base de chaux qui réagit avec l'argile par :

- Echange cationique ;
- Floculation et agglomération ;
- Carbonations ;
- Réaction pouzzolanique.

Ces réactions se traduisent par :

- Une amélioration immédiate des propriétés mécaniques du sol et une diminution de la sensibilité à l'eau par floculation et échange cationique.
- Une réaction lente produisant les matériaux cimentant. C'est la réaction pouzzolanique. **(Bekhouche, 2019).**

II .3.4. 1. 1 Stabilisation par l'ajoute de la chaux

La stabilisation du sol à la chaux trouve son application dans la construction de routes et chemins de toutes natures. Effectuée dans la zone supérieure de la couche de base ou de la sous couche, cette stabilisation à la chaux utilisée comme technique de construction pour protéger les routes contre les actions du gel ou du dégel **(Gheddache, 2012)**.

II .3.4. 1.1.1. Définition

La chaux est un produit naturel et biologique, qui respecte l'environnement, la chaux est une matière, généralement, poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis l'antiquité, notamment dans la construction. Elle trouve une place privilégiée dans le secteur du traitement des sols, et sa qualité a une

influence directe sur l'efficacité du traitement des sols. Certaines propriétés de la chaux présentent des avantages particuliers pour les traitements de sols.

II.3.4.1.1.2 Différents types de la chaux

Sont obtenus par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux

- Chaux aérienne provenant d'un calcaire pur ;
- Chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium ;
- Chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux. Les chaux utilisée en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes elles se présentement sous deux formes :
- Chaux vive : elle est principalement constituée d'oxyde de calcium CaO
- Chaux éteinte (ou hydraté) : elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium CO(OH) 2.elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique **(Gheddache, 2012).**

II.3.4.1.1.3 Mécanismes de stabilisation à la chaux

- Les théories de stabilisation à la chaux suggèrent cinq mécanismes de base :
- **Absorption d'eau:** En présence d'eau, dans une terre humide, la chaux vive subit une réaction d'hydratation qui s'accompagne d'un important dégagement de chaleur : environ 300kcal/kg de chaux vive.

- **Echange cationique:** Lorsque l'on ajoute de la chaux à une terre humidifiée, celle-ci est saturée d'ions de calcium. Apparait alors un phénomène d'échange de cations : les ions
- de calcium se substituent aux actions échangeables du complexe de la terre tels que magnésium, sodium, potassium et hydrogène. L'importance de cet échange cationique dépend de la quantité de cations échangeables présents dans la capacité totale d'échange cationique de la terre.
- **Floculation et agglomération :** Du fait de l'échange de cations et l'augmentation de la quantité d'électrolytes dans l'eau interstitielle, les particules de la terre floculent et s'agglomèrent ; il y a augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine. La texture et la structure changent.

- **Carbonatation :** La chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former des ciments carbonatés médiocres. Cette réaction consomme une partie de la chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques.
- **Réaction pouzzolanique :** c'est de loin le mécanisme le plus important qui influence principalement la stabilisation à la chaux les propriétés de résistance du matériau résultent pour l'essentiel d'une dissolution des minéraux argileux dans un environnement alcalin produit par la chaux et de la recombinaison de la silice et de l'alumine des argiles avec le calcium pour former des silicates complexes d'aluminium et de calcium qui cimentent les grains entres eux. La chaux doit être ajoutée à la terre en quantité suffisante afin de produire et de maintenir un pH élevé nécessaire à la dissolution des minéraux argileux, et pour une période suffisante qui permettra une réaction de stabilisation effective **(Hugo ; Hubert, 1995).**

II.3.4.1.2 stabilisation des sols au ciment

La stabilisation de sols au ciment trouve son application tant pour les couches que pour la zone supérieure de la couche de fondation ou de la sous couche de fondation ou de la sous couche de route et chemins de toute nature.On l'utilise également pour d'autres surfaces de circulation. L'action, de stabilisation par les ciments, est complexe et dépend de la nature du sol, de la teneur en ciment, de la teneur en eau et des conditions de température **(Johson, 1960).**

II.3.4.1.2.2 Type de ciment

Les ciments selon la norme européenne doivent au moins être désignés par leur type, complété du nombre 32.5, 42.5 ou 52.5 qui désignent la classe de résistance. La classe de résistance à jeune âge est fixée par l'ajout de la lettre N ou ROndistinguecinq types de ciments courants :

- CEM I :Ciment Portland ;
- CEM II :Ciment Portland composé ;
- CEM III:Ciment de haut-fourneau ;
- CEM IV : Cimentpouzzolanique ;
- CEM V: Ciment composé. **(Messaoudi, 2018).**

II.3.4.2. Stabilisation par polymères

Les polymères sont attirés par la surface des argiles quand ils portent des charges positives, et par les extrémités des feuillets quand les charges qu'ils portent sont négatives. La grande taille

de ces molécules permet une sorte d'encapsulage qui limite l'hydratation ultérieure de l'argile **(Belabbaci, 2014).**

Hachichi et al., 2005, ont traité des argiles de Sidi Chahmi et de Mers El Kébir en présence des Polymères ils ont conclu qu' une forte concentration en polymères à pour effet de diminuer le gonflement final.

Les polymères utilisés à différentes concentrations sont en nombre de quatre :

- Carboxyl methyl cellulose low viscosity : CMC LV (2, 4, 6, 8 g /l);
- Carboxyl methyl cellulose low viscosity treated : CMC LVT (2, 4, 6, 8 g /l);
- Carboxyl methyl cellulose high viscosity : CMC LVT (1,3, 4.5 g /l);
- Hydroxyle éthyle cellulose: NATRASOL HEC (1, 2,4 g/l).

II.3.4.3.Stabilisation par cendres volantes

Les cendres volantes, produites dans la combustion des charbons bitumineux, présentent des caractéristiques de cimentage et peuvent être utilisées dans une large gamme des applications de stabilisation.

Le traitement de cendres volantes peut efficacement réduire le potentiel de gonflement des argiles fortement plastique et empêcher le gonflement sous les pressions plus petites de base.

Zalihe, 2004, a étudié la stabilisation des argiles gonflantes par les volantes. Les résultats d'essai en laboratoire sur ces sols indiquent que ces cendres volantes sont efficaces à l'amélioration de la texture et la plasticité des sols traités. Elles permettent de réduire l'indice de plasticité et le potentiel de gonflement. La réduction en valeurs de la pression de gonflement des deux sols indique que le gonflement des sols est empêché pour de petites valeurs de pression. Le traitement par les cendres volantes change la minéralogie du sol traité et produit de nouveaux minéraux secondaires. L'utilisation des cendres volantes comme matériaux de stabilisation pour le sol semble être une solution intéressante. Cette utilisation aurait des avantages, en plus de la stabilisation environnementale **(Belabbaci, 2014).**

II.4. Conclusion

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Plusieurs méthodes et appareillages ont été mis au point pour connaître l'influence et l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux.

Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

Chapitre III:
Présentation des matériaux d’étude

Chapitre III : Présentation des matériaux d'étude

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons de façon détaillée la démarche expérimentale ainsi que les moyens mis en œuvre pour caractériser le matériau étudié (sol, copeaux de bois) et puis nous étudierons les mélanges (sol fin + copeaux de bois) à déférents teneurs choisir l'aide des essais physique et mécanique. Les compagnes d'essais sont effectuées au Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP Médéa).

III.2. Matériaux utilisés

Les matériaux qui ont fait l'objet de notre étude sont le sol fin et les copeaux de bois (déchets de menuiserie).

III.2.1. Le marne

III.2.1.1. Localisation de site sol étudié

Le sol fin qui fait l'objet de cette étude a été prélevé à site dite Kouala wilaya de Médéa au nord de l'Algérie (Figures III.1 et 2) dont les coordonnées sont les suivantes :

Tableau III.1: Les coordonnées de site de marne

Latitude	longitude
36°17'42.98"N	2°45'51.92"E

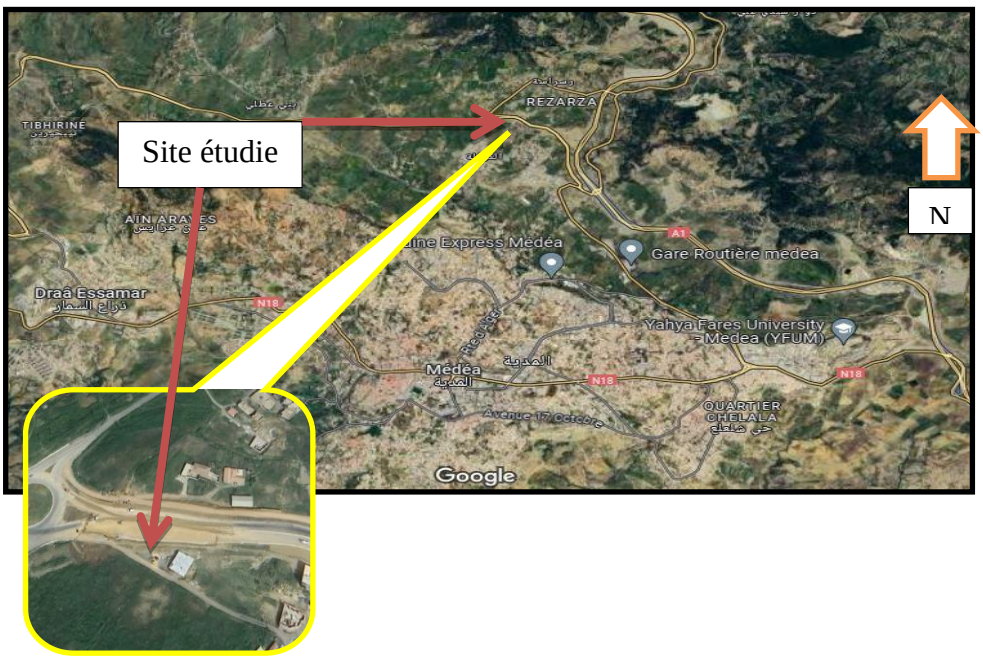


Figure III.1 : Localisation du site d'approvisionnement de sol étudié



Figure III.2 : Opération d'extraction de marne

III.2.1.2. Caractéristiques géotechniques du sol étudié

Le matériau est préparé de manière à ne pas modifier ces caractéristiques, Après prélèvement du sol (figure III.3), des échantillons ont été soumis au séchage dans une étuve à la température de 105°C, ensuite broyage et tamisage.



Figure III.3 : le sol étudié (Le marne)

Dans ce travail nous allons donner le programme d'essai suivi afin de faire une caractérisation physique et mécanique de sol testé, le protocole expérimental effectué sur matériau marneux selon les normes Française. Les différents essais effectués dans ce travail est résumé dans le tableau ci-dessous:

Tableau III.2 : Les différents essais effectués

Essais		Norme
Essais physiques	Valeur du bleu de méthylène	NF P 94-068
	Teneur en eau	NF P 94-050
	L'analyse granulométriques par Sédimentométrie	NF P 94-057
	L'essai des limites d'Atterberg	NF P 94-051
Essais mécaniques	L'essai de Proctor modifié	NF P 94-093
	L'essai de cisaillement la boite	NF P 94-071-1

III.2.1.2.1. Essai de bleu de méthylène (NF P94-068)

La valeur de bleu de méthylène d'un sol (VBS) mesure la capacité d'adsorption et l'activité des minéraux argileux présents dans la fraction fine du sol. L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène en ajoutant successivement différentes quantités de bleu méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre pour créer une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair continu à apparaître au bord de la tâche. La valeur du VBS est exprimée par la formule suivante :

$$VBS = 100 * \frac{B}{m_0} \quad \text{——} \quad (3)$$

$$B = V_b * 0.01 \quad \text{——} \quad (4)$$

Avec :

m_0 : Masse sèche de la prise d'essai (g)

: Le volume de la solution de bleu utilisée (ml)

La surface spécifique totale est la surface des grains solides sur laquelle le bleu de méthylène se fixe est donnée par : $SST = 21.VB\ (m^2/g)$ —— (5)

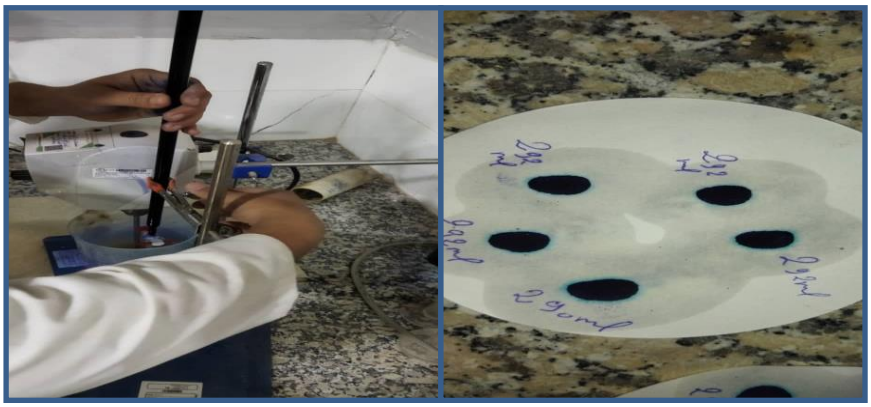


Figure III.4 : Essai de bleu de méthylène (LCTP Médéa)

Les résultats obtenus de notre matériau sont récapitulés dans le tableau III.3 :

Tableau III.3 : Résultat de la valeur du bleu de méthylène

Le volume Injecté (ml)	m_0 (g)	VBS	SST
292	50	5.84	122.64

Selon le tableau III.4 (NF P 94-068), le résultat obtenu montre que le sol fin étudié de moyenne activité argileuse.

Tableau III.4 : Qualificatif l'activité de la fraction argileuse selon le coefficient VBS (NF P 94-068)

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

Selon aussi « le Guide Technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme », (GTR.2000), en fonction de la valeur de bleu de méthylène qui est égale à 5.84, le sol étudié est placé dans le groupe des sols limoneux-argileux.



Figure III.5: Classification GTR de sol par VBS

III.2.1.2.2. Teneur en eau naturelle (NF P 94-050)

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

$$w = \frac{(M1 - M2)}{M2} * 100 \quad \text{——} \quad (6)$$

Donc la teneur en eau contenue dans le sol testé est de **24.1%.**

III.2.1.2.3. Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P 94-057)

C'est un essai géotechnique qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol et qui peut être nécessaire à sa description. Il s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure à 0.08mm. Le Principe de l'essai est:

- Basé sur la loi de Stockes qui mesure la vitesse (v) de décantation des particules sphériques.
- Fonction de la viscosité du milieu défloculent pour décoller les feuillets d'argile, Solution d'hexamétaphosphate de sodium à 5%.
- Mesure de la masse volumique du liquide, avec un Densimètre, à 0.5, 2, 5, 10, 20, 40, 80, 240,1440 minutes.

L'a Appareillage utilisée est:

- Deux éprouvettes de 2 litre.
- Un densimètre.
- Un agitateur mécanique.
- Un thermomètre; chronomètre.
- Un agent défloculent" hexamétaphosphate de sodium NaPO3".
- Agitateur manuel.

On prend 80g de matériau sec (sol) pour une éprouvette de 2 litres. On met à imbiber les 80 g de matériau sec dans le récipient de l'agitateur mécanique. Cette imbibition doit être faite au moins 12 h à 15 h avant la dispersion à l'agitateur mécanique en utilisant environ 500 cm^3 d'eau distillé additionnée de 60 cm^3 d'héxam et aphosphate de sodium concentré à 5% dont la durée de vie de la solution ne dépasse pas un mois (figure III.6).

L'agitateur mécanique qui doit séparer convenablement les grains doit être fait pendant 3 minutes à 10000 à 12000 tr/min. On verse la suspension dispersée dans l'éprouvette de 2 litres et on rince soigneusement le récipient de l'agitateur mécanique, puis on complète par l'eau distillé à 2 litres exactement.

Avant de plonger le densimètre, agiter vigoureusement la suspension pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette. Retirer l'agitateur et déclencher au même moment le chronomètre, puis plonger lentement le densimètre, faire les lectures au sommet du ménisque. Noter le nombre R lu à partir de la graduation 1000 affecté du signe (+) pour les lectures supérieures à 1000.

Les lectures sont faites à : 30s ; 1 min ; 2 min ; 5 min ; 10 min ; 20 min ; 30 min ; 60 min ; 120 min ; 240 min et 1440 min soit 24h ces temps sont comptés à partir du début de l'essai.

Les trois premières lectures (à 30 sec ; 1 min ; 2 min) se font sans retirer le densimètre de la suspension, après la lecture à 2 min, on relève la température de la suspension au 1 / 10 de degré prés. Pour les autres lectures, plonger le densimètre 15 à 20 secondes avant la lecture. Noter la température après chaque lecture. Les résultats d'essai sont présentés dans tableau III.5 et traduire en courbe dans la figure III.7.



Figure III.6 : Essai d'analyse granulométrique par sédimentométrie (LCTP Médéa)

Tableau III.5: Les résultats des analyses granulométriques par sédimentation

D(mm)	Passants %
0,08	95,1
0,06	92
0,05	91,7
0,03	91.1
0,02	90,94
0,014	90,92
0,01	90,91
0,007	86,9
0,005	83
0,003	71,00
0,0015	48

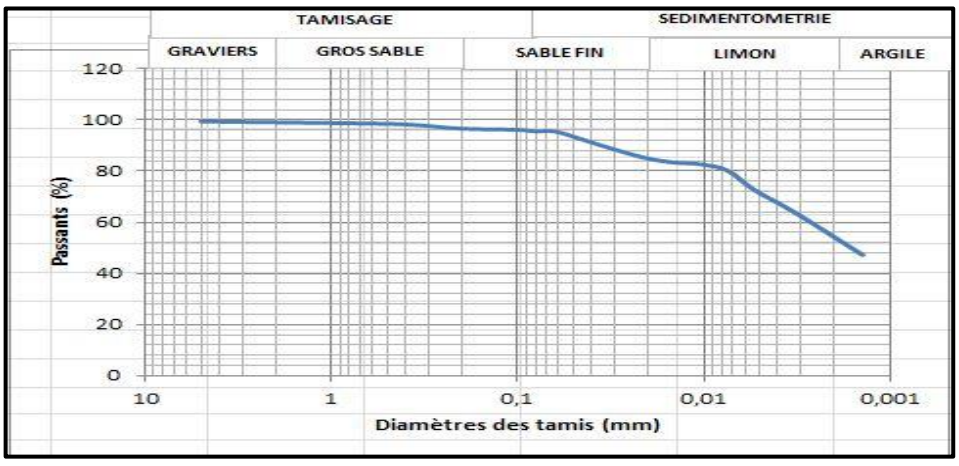


Figure III.7. Les résultats des analyses granulométriques par sédimentation

A partir de courbe granulométrique de notre sol, nous concluons que le sol étudié est **très fins**, car le pourcentage des éléments fins **(<80µm)** présentent plus de **95%**. Cette valeur indique que le sol présente une granulométrie très fine de classe **A3** selon la classification GTR.

III.2.1.2.4. Limites d'Atterberg (NFP 94-051)

Les limites de liquidité et de plasticité, dites limites d'Atterberg ou limites de consistance, sont des paramètres géotechniques destinés à identifier les sols, caractériser leur consistance et permettre de ce fait de les classer (NFP 94-051).

Cet essai se pratique sur la fraction de sol dont les particules ont une dimension inférieure à 0,42 mm. Par définition, la teneur en eau W d'un sol est le rapport entre le poids d'eau Ww et le poids de sol sec Ws. Elle est exprimée en %. En 1905, Atterberg a défini des teneurs en eau fixant les limites entre les 3 états. Si à un échantillon de sol préalablement desséché et pulvérisé, on fait croître la teneur en eau de façon homogène par malaxage, il passe progressivement de l'état solide, à l'état plastique puis à l'état liquide.

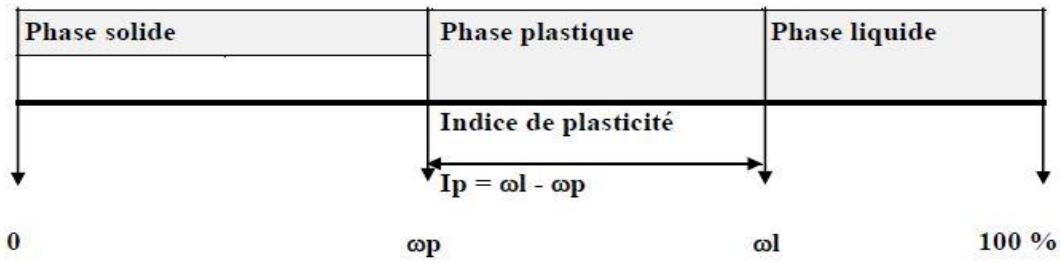


Figure III.8 Représentation des limites d'Atterberg

Le principe de l'essai est de :

- **Détermination de la limite de liquidité:** On recherche la valeur de la teneur en eau pour laquelle une rainure de dimension normalisée, pratiquée dans le sol disposé dans la coupelle de Casagrande, se ferme sous l'action de 25 chocs appliqués.
- **Détermination de la limite de plasticité:** Il s'agit de rechercher la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol de diamètre 3mm, confectionné manuellement, se fissure lorsqu'on le soulève.

L'**appareillage utilisé est :**

- Matériel pour la préparation du sol **:** Un récipient, un bac et un tamis à la maille carrée de 0,4mm d'ouverture.
- Matériel pour la détermination la limite de liquidité WL **:** Un appareil de Casagrande. une balance, une étuve, des capsules ou boites de pétri, spatule et truelles.

- Matériel pour la détermination la limite de plasticité Wp: Une plaque lisse en marbre pour le malaxage et la confection des rouleaux de sol, des capsules ou boites de pétri, des spatules et une balance.

La préparation d'échantillon sous faite come suite:

- Imbiber une masse de sol dans un récipient d'eau;
- Tamiser par voie humide au tamis 400µm;
- Recueillir l'eau de lavage et le tamisât dans un bac;
- Siphonner l'eau claire du bac sans entraîner de particules solides après une décantation d'au moins 24 heures;
- Evaporer l'eau excédentaire à une température ne dépasse pas 105°c;
- Malaxer la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte homogène.

a) Limite de liquidité

- Prendre une partie de la pâte et l'étaler dans la coupelle de l'appareil de Casagrande à l'aide de la spatule;
- Pratiquer une rainure dans cette pate de telle sorte à la diviser en deux. L'outil à rainurer devra être tenu perpendiculairement a la coupelle en présentant sa partie biseautée face a la direction du mouvement;
- soumettre la coupelle et le matériau qu'elle contient a des chocs répétés avec une cadence de 2 coups par seconde;
- Arrêter les chocs quand les deux lèvres se rejoignent sur environ 1cm, noter le nombre de coups N correspondant;
- Prélever des deux côtés des lèvres à l'endroit où elles se sont refermées environ 5 gr de sol. afin d'en déterminer la teneur en eau;
- Rehomogénéiser le sol et le sécher un peu puis reprendre les opérations de 3 a 7. IL faut au moins trois essais avec un nombre de coups croissant et de préférence bien étalé entre 15 et 35.



Figure III.9: Détermination de la limite de liquidité

b) Limite de plasticité

On mélange l'échantillon avec des quantités variables d'eau, on façonne avec la pâte un rouleau de 3 mm ± 5 de diamètre pour une centaine de 10 mm de longueur. La limite de plasticité est la teneur en eau en % du rouleau qui se fissure et se brise lorsqu'il atteint un diamètre de 3 mm.

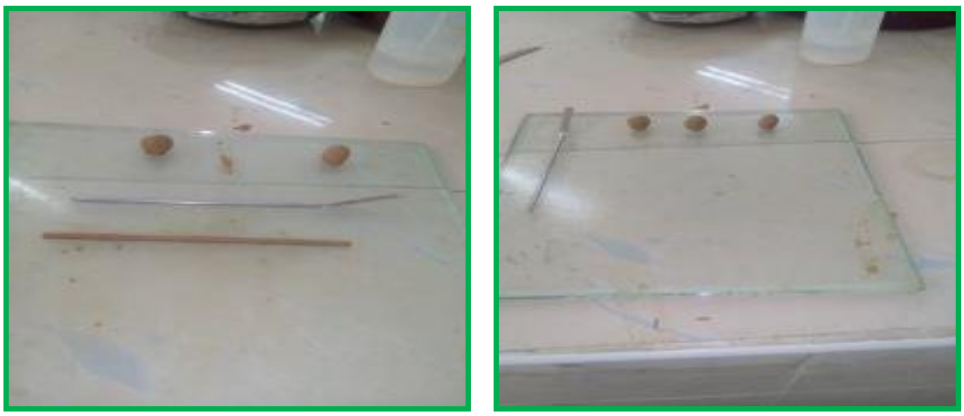


Figure III.10: Détermination de la limite de plasticité

c) Calcul et resultants

- **Limite de liquidité**

Les résultats obtenu sont s'exprime dans le tableau III.6 et traduire en courbe dans la figure III.11.

Tableau III.6 : Résultats de limite de liquidité

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3	Échantillon 4
Nombre de coups N	18	22	28	35
Teneur en eau (W) %	67,18	65,9	63,09	60,53

$$W_L(\%) = W\,(N/25)^{0.121}$$

WL1 (%) =64.56%, WL1 (%) =64.88%, WL1 (%) =63.96%, WL1 (%) =63.05%

$wl = \frac{wl1+wl2+wl3+wl4}{4}$= 64.11 % ➔ **WL (%) = 64.11%**

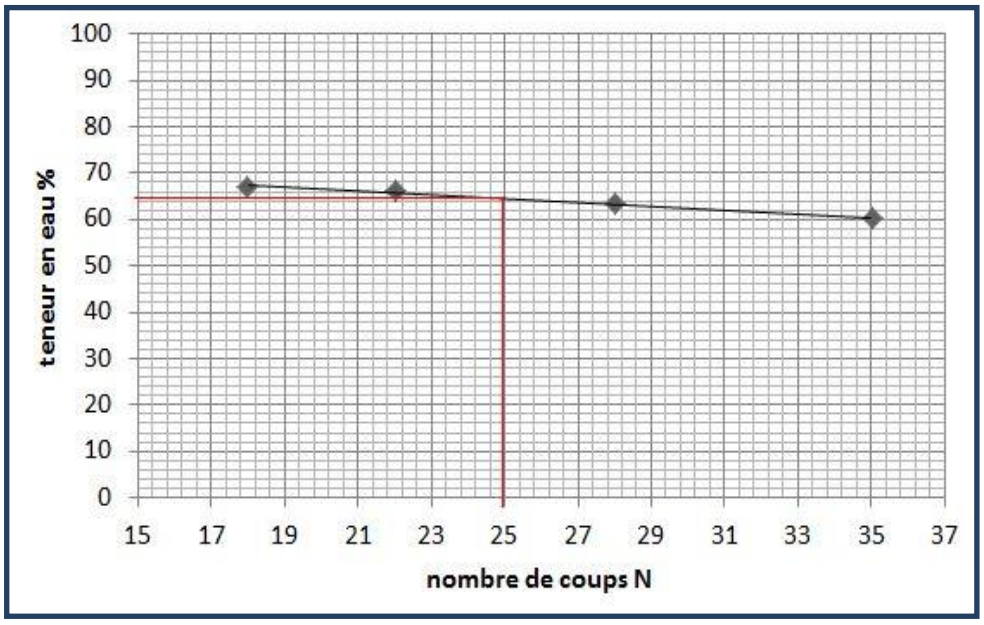


Figure III.11: Courbe de limite de liquidité

La valeur moyenne de limite de liquidité est de **64.11%**

Limite de plasticité

Tableau III.7: Résultats de limite de plasticité

	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
Teneur en eau %	23.99	23.95	23.97

$wP = \frac{w1+w2+w3}{3}$=23.97% ➔**Wp (%) =23.97 %**

Détermination de l'indice de plasticité (I_P)

$$I_P\ (\%) = W_L - W_P$$ ➔**I_P (%) = 64.12– 23.97 = 40.15 %**

Suivant la valeur de l'indice de plasticité, les sols peuvent se classer comme suit :

Tableau III.8. Degré de plasticité des sols

Indice de plasticité	Degré de plasticité
0 <Ip< 5	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
5 <Ip< 15	Moyennement plastique
15 <Ip< 40	Plastique
Ip> 40	Très plastique

A partir les résultats obtenus, on a I_P= 40.15 > 40, donc on classe le sol suivant son degré de plasticité comme **une argile très plastique.**

Détermination de l'indice de consistance Ic

L'indice de consistance permet de caractériser l'état de sol étudié, cet indice est calculé par la formule suivante :

$$Ic = \frac{WL - W}{Ip}$$

Avec :

W : est la teneur en eau naturelle d'un sol

$$Ic = \frac{64.12 - 24.1}{40.15} = 0.997$$

Tableau III.9 : Etat du sol en fonction de l'indice de consistance (J.M. TCHOUANINANA(1999))

Indice de consistance Ic	Etat du sol
Ic> 1	Solide
0 <Ic< 1	Plastique
Ic< 0	Liquide

Les résultats montrent que l'état de sol étudié est **plastique.**

Le tableau III.9 et la figure -ci-dessous résume les limites trouvées pour l'argile étudié.

Tableau III.10 : Résultat des limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg	Wl	Wp	Ip	Ic
Valeurs (%)	**64.12**	**23.97**	**40.15**	**0.997**

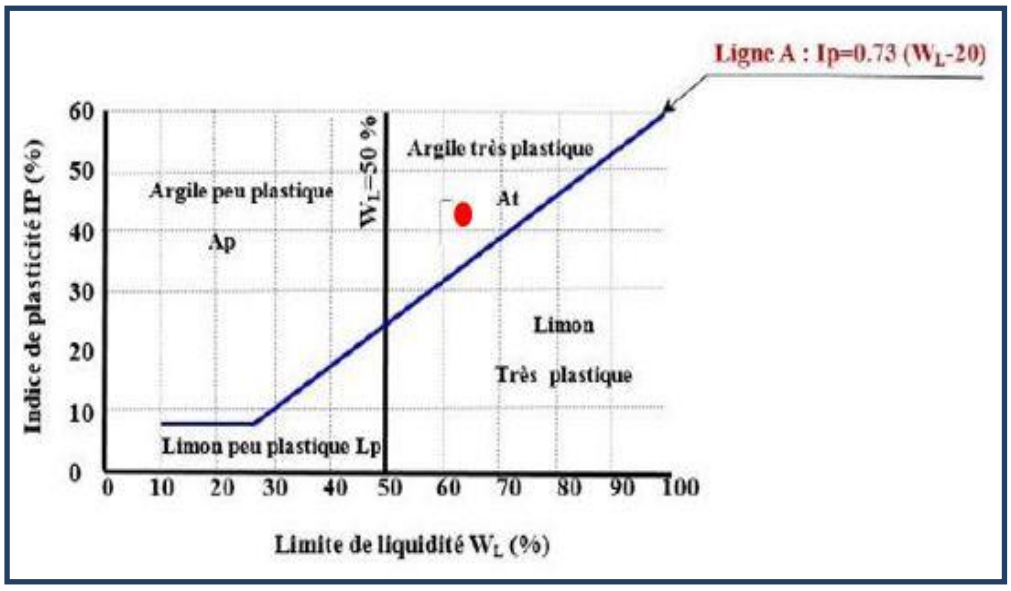


Figure III.12 : Classification de l'échantillon selon l'abaque de Casagrande

La classification de sol étudié selon CASAGRANDE est une **argile très plastique**

III.2.1.2.5. Essai de Proctor modifié (NF P 94-093)

L'essai Proctor a pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximum. La teneur en eau ainsi déterminée est appelée « Teneur en eau optimum Proctor ».

L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame à énergie constanteet selon un processus bien déterminé, un échantillon du sol à étudier et à déterminer le teneur en eau du sol et sa densité sèche après le compactage.

L'essai Proctor est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (12% ,14%,16%)On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau. On trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux. Elle représente un maximum dont l'abscisse est « la teneur en eau optimum Proctor », et l'ordonnée « la densité sèche maximum Proctor ».

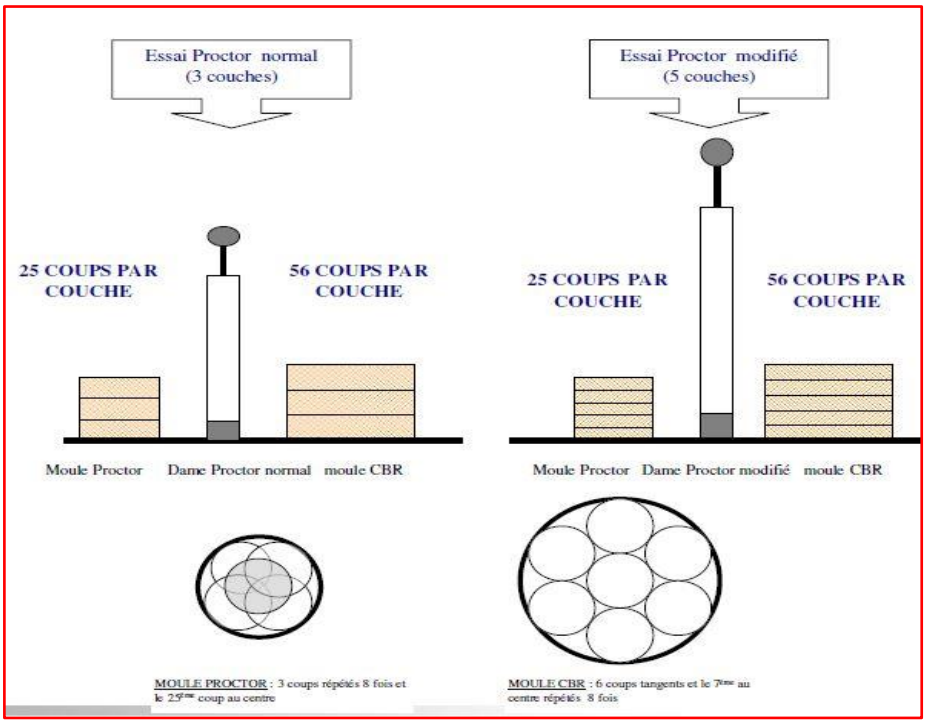


Figure III.13 : Schéma de principe de l'essai de Proctor

Un échantillon de sol à particules inférieures à 20 mm est compacté en 5 couches dans un moule (moule C.B.R) avec une certaine énergie fournie par une dame d'un poids de 4.5 kg tombant d'une hauteur constante.Chaque couche est compactée 56 coups.L'essai est réalisé sur plusieurs échantillons chacun à une teneur en eau différentes.

Le compactage s'effectue selon le schéma de la Figure III.14, le nombre de coups par couche est :

- Pour le moule Proctor et par couche : 6 séquences de 4 coups dans chaque quadrant et le 25eme coup au centre.
- Pour le moule C.B.R et par couche : 8 séquences de 7 coups (six approximativement tangents à la périphérie et le 7ème au centre).

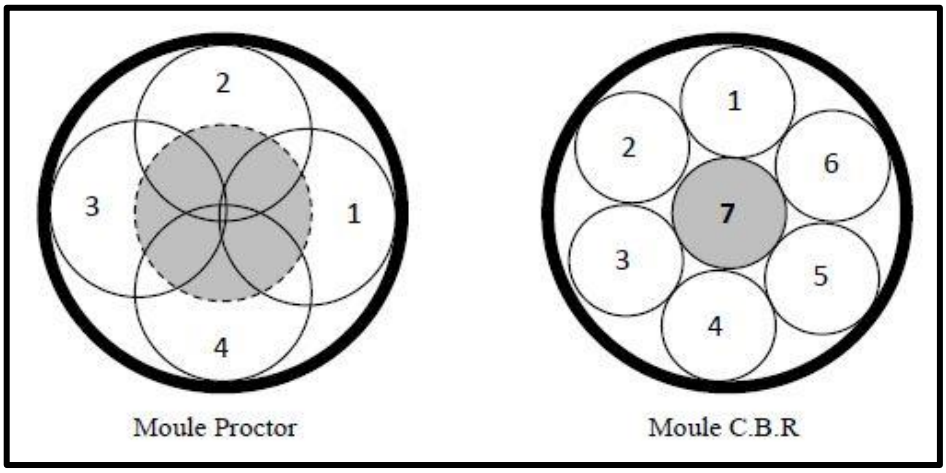


Figure III.14 : Schéma de principe de la répartition des coups de dame sur une couche



Figure III.15: Matériel de l'essai Proctor

Les résultats obtenus sont lustrés dans le tableau III.11.

Tableau III.11: Les résultats de l'essai Proctor rmodifié

Pourcentage d'eau (%)	12	14	16
Masse total humide (g)	10302	10481	10498
masse du moule (g)	5789	5789	5789
masse du sol humide (g)	4513	4692	4709
masse du sol sec 'g)	4013	4102	4048
volume moule (cm3)	2295	2295	2295
masse volumique humide (t/m3)	1,966	2,044	2,051
masse volumique séche (t/m3)	**1,75**	**1,79**	**1,76**
masse de la tare (g)	426,3	495,7	495,6
masse (sol humide+ tare) (g)	1115,3	1124	1023
masse (sol sec + tare) (g)	1035	1045	949
masse d'eau (g)	76	79	74
masse du sol sec (g)	612,7	549,3	453,4
teneur en eau W(%)	**12,5**	**14,4**	**16,3**

On trace la courbe (figure III.16) de la teneur en eau en fonction de la masse volumique, on tire la densité sèche max, et la teneur en eau optimale correspondante.

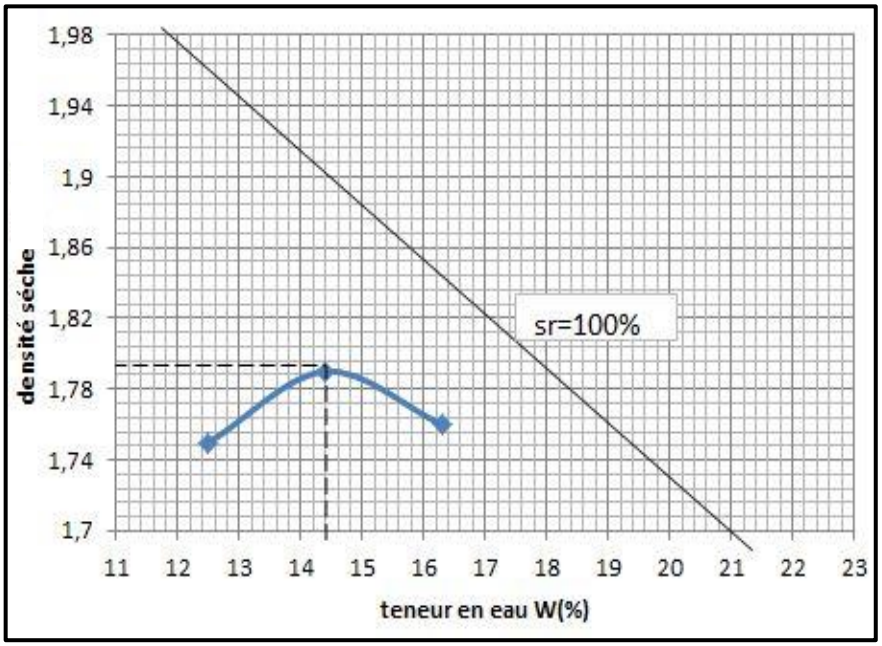


Figure III.16: Courbe Proctor modifié

La valeur de la densité sèche **γdmax= 1.79,** et la teneur en eau optimale correspondante égale a **14.5 %.**

III.2.1.2.6. Essai de cisaillement à la boite de Casagrande (NF P 94-071-1

Détermination des paramètres de résistance au cisaillement des sols et principalement la cohésion et l'angle de frottement dans le cas d'essai. L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boite de cisaillement constituée de 2 demi-boites indépendantes. L'essai est réalisé sur 3 éprouvettes en augmentant à chaque fois la contrainte normale appliquée.

L'appareillage utilize est :

- Le bâti.
- La boite de cisaillement.
- Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette.
- Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre Ses deux demi-boites.
- Le système de mesurage des efforts, des déplacements et du temps.
- Demi-boites inférieure et supérieure.
- Fond et couvercle.
- Pierres poreuses.
- Plaques striées (drainantes ou non).
- Vis de montage des demi-boites.

La vitesse de déplacement de la demi-boite inférieure est assurée par une boite de vitesses. La vitesse choisie pour l'essai est de 1mm/min.



Figure III. 17: La machine de cisaillement

Le mode opératoire est comme suite:

- Les vis de fixation de l'anneau dynamométrique doivent être desserrées.
- Assembler les 2 demi-boites puis placer le fond, une pierre drainante et, une plaque striée.

- Prélever avec la trousse coupante un échantillon de sol, le peser. Cette pesée peut servir à calculer la masse volumique du sol.
- Placer l'échantillon dans la boite.
- Tasser légèrement l'échantillon avec le pilon (cette opération sera effectuée si le sol a été prélevé en profondeur).
- Compléter le montage de la boite avec la plaque striée supérieure, la pierre poreuse et le couvercle.
- Placer la boite dans le bâti, la demi-boite supérieure étant solidaire de l'anneau dynamométrique de mesure de l'effort de cisaillement.
- Amener le système de mise en charge verticale au droit de la boite vissé le doigt de mise en charge de manière à assurer le contact avec le couvercle.
- Placer une charge sur le plateau.
- abaisser le plateau pour libérer cette charge, alors commence la consolidation du sol.
- Serrer les vis de fixation de l'anneau dynamométrique de manière à combler les jeux (1.8kg, 3.6kg, 7.2kg).
- Retirer les vis d'assemblage de la boite.
- Mettre en route, l'essai commence. Il faut en général relever la valeur indiquée par l'anneau dynamométrique toutes les 25 secondes.
- L'essai peut s'arrêter automatiquement.



Figure III. 18 : Matériel de l'essai de cisaillement

Calcul et résultats

La figure III.19 présente la variation des contraintes de cisaillement en fonction des déformations relatives pour les trois contraintes normales : 50, 100 et 200 KPa.

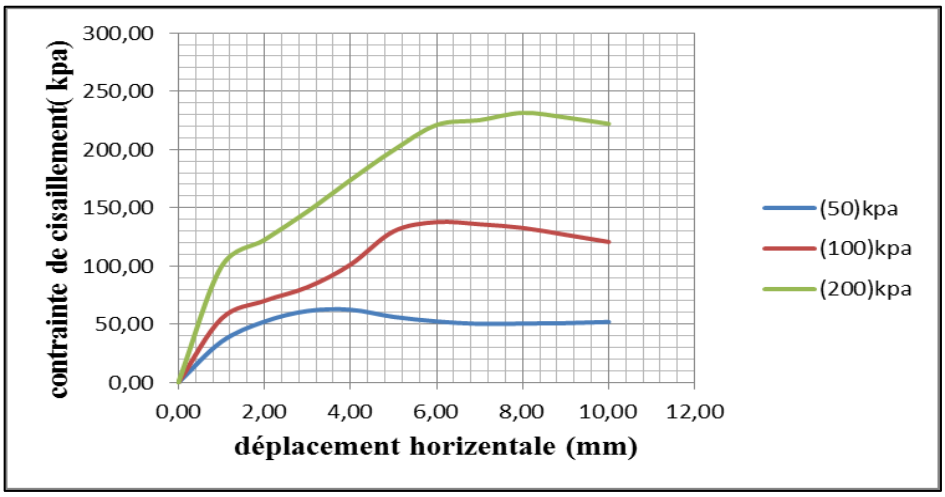


Figure III.19 : Contrainte de cisaillement en fonction des déformations

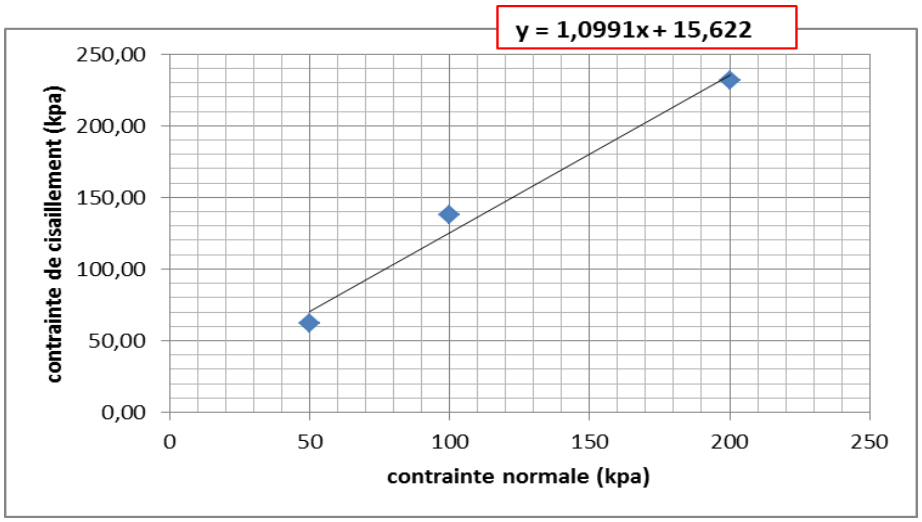


Figure III.20 : Courbe contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale

D'après la courbe intrinsèque (Figure III.20) il y a une ligne droite qui correspond à l'équation d'identification avec l'utilisation de l'équation de coulomb : $\tau = \sigma \mathrm{tg}\,\varphi + \mathrm{C}.$

Donc les résultats obtenus sont :

L'angle de frottement **φ = 47.7°** et la cohésion **C= 15.62 KPa**

III.3. Copeau de bois

Par définition la copeau de bois c'est une petite chute de bois très mince et très légère, de forme généralement arrondie, arrachée par un outil tranchant comme la hache, le rabot, la varlope, lors du travail du bois. Les copeaux de bois que nous avons utilisés dans la présente étude proviennent du Sapin, résulte des déchets de la menuiserie. Ils présentent un aspect de forme irrégulière (Figure III.21), avec une limite granulométrique supérieure voisine de 10 mm et une limite granulométrique inférieure voisine de 0.016 mm (Figure III.22). La masse volumique absolue est de l'ordre de 535 kg/m^3 et la masse volumique apparente est de l'ordre de 69.25 kg/m^3. L'absorption d'eau, mesurée après immersion totale des copeaux de bois jusqu'à stabilisation de la masse et exprimée par le rapport massique « eau/copeaux » est voisine de 169.70 % **(Guermiti et al 2024).**



Figure III.21: Les copeaux de bois (Source auteures)



Figure III.22: Courbe de granulométrie des copeaux de bois **(Guermiti et al 2024)**

III.4.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué différents essais au laboratoire afin de déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques de notre sol utilisé

- D'après les résultats de l'analyse granulométrique réalisée donne un pourcentage des passants à 80 μm égale à 95 % .Cette valeur indique que le sol présente une granulométrie très fine de classe A3 selon la classification GTR.
- Selon aussi « le Guide Technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme », en fonction de la valeur de bleu de méthylène qui est égale à **VBS=5.84**, le sol étudié est placé dans le groupe des sols limoneux-argileux.
- Les résultats de l'indice de plasticité **(Ip = 40.15 %)** indiquent que le sol étudié est une argile très plastique.
- La valeur de la densité sèche **γdmax= 1.79**, et la teneur en eau optimale correspondante égale a**14.5 %.**
- Le résultat de l'essai de cisaillement montrent -L'angle de frottement **φ = 47.7°** et la Cohésion **C= 15.62 KPa**

Dans le chapitre suivant on présente l'influence de l'ajout de déchets de menuiserie (Copeaux de bois) à différentes proportions sur le comportement mécanique d'argile étudié, on base sur les paramètres de Proctor modifié, résistance à cisaillement et limites d'Atterberg.

Chapitre IV :
Etude expérimentale de mélange (sol fin + copeau de bois)

Chapitre IV : Etude expérimentale de mélange (sol fin + copeau de bois)

IV.1. Introduction

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'effet de l'ajout des copeaux de bois sur les propriétés mécaniques de sol fin et de mettre en évidence les différences de comportement de ce sol. Les résultats de caractérisation géotechnique du sol fin de référence (argile) ont été déterminés dans le chapitre précédent. Il est proposé dans cette partie de le traiter et de le stabiliser à l'aide des déchets de menuiserie (copeaux de bois), selon le programme suivant :

Etude du mélange (argile + copeaux de bois) selon les proportions de 2%; 4%; 6% et 8% d'ajouts par rapport au poids du sol de référence.

On présente la caractérisation physique et mécanique des sols non traité et traité qui a été réalisée selon le protocole expérimental suivant:

- Les limites d'Atterberg (limite de liquidité, limite de plasticité et l'indice de plasticité).
- -Essai de compactage a été effectué pour déterminer la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale ;
- La différence des valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement des sols traité et non traité a été établie en effectuant l'essai de cisaillement direct.

IV.2. Préparation des mélanges

En premier lieu le matériau doit être séché à l'étuve à 105ºC pendant 24 heures, ensuite broyé, et tamisé. La deuxième étape consiste à ajouter des quantités de copeau de bois au sol selon le pourcentage voulu, le mélange est ensuite mis dans un bac pour effectuer le malaxage manuellement. Ensuite on ajoute la quantité d'eau nécessaire au mélange graduellement (Figure IV.1). 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 (sol + copeaux de bois)

IV.3. Résulta et discussion

IV.3.1. Effet des copeaux de bois sur les limites d'Atterberg

Nous avons réalisé des essais de limites d'Atterberg sur le sol traité avec différents pourcentages des copeaux de bois (0%, 2%, 4%, 6% et 8%). Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau IV.1 :

Tableau IV. 1 : Résultats des limites d'Atterberg.

Pourcentages des copeaux de bois l'ajouté (%)	**WL (%)**	**WP (%)**	**IP (%)**
0%	64,12	23,97	40,15
2%	62,78	27,96	34,82
4%	58,55	30,33	28,22
6%	43,75	23,18	20,57
8%	54,59	35,82	18,77

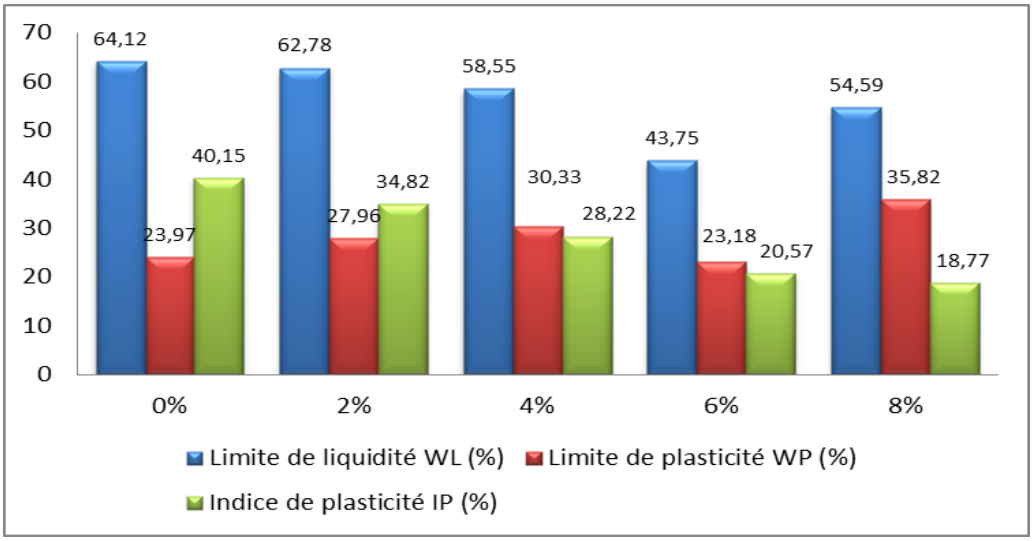


Figure IV.2 : Les limites d'Atterberg en fonction de teneur en copeaux de bois

La Figure IV.2 montre l'effet de copeaux de bois sur les limites de liquidité (WL), les limites de plasticité (WP) et les indices de plasticité (IP). Il ressort des résultats des limites d'atterberg que lorsque les copeaux de bois est ajoutée au sol avec un pourcentage de 2 ; 4 ; 6 et 8%, les valeurs de limite de liquidité et limite de plasticité atteignent respectivement (62.78; 58.55; 43.75 et 54.59) et (27.96 ; 30.33 ; 23.18 et 35.82). La valeur de l'indice de plasticité passe de 40.15% à 18.77 % pour 0% à 8% de copeaux de bois.

Nous avons remarqué que l'ajout de copeaux de bois conduit à la diminution de la limite de plasticité dans tous les mélanges. Il apparait donc une amélioration de la plasticité du sol traité qui devient moins plastique, c'est-à-dire un changement de consistance.

IV.3.2. Effet de l'ajout des copeaux de bois sur les paramètres de Proctor

Nous avons réalisé l'essai de compactage Proctor modifié sur tous les mélanges (0%, 2%, 4%,6% et 8%) pour voir la variation des valeurs du poids volumique et la teneur en eau correspondant de chaque teneur.

Le résultat de l'essai Proctor modifié obtenus sont reportés dans le tableau IV.2 suivant

Tableau IV.2: Influence de teneur en copeaux de bois sur les paramètres de compactage

Teneur en copeaux de bois (%)	0	2	4	6	8
W_{opt} (%)	**14.5**	**15.7**	**18.1**	**21.7**	**23.1**
γ_{dmax}	**1.79**	**1.73**	**1.65**	**1.54**	**1.48**

Les variations de la densité sèche en fonction de la teneur en eau sont représentées dans les figures suivantes :

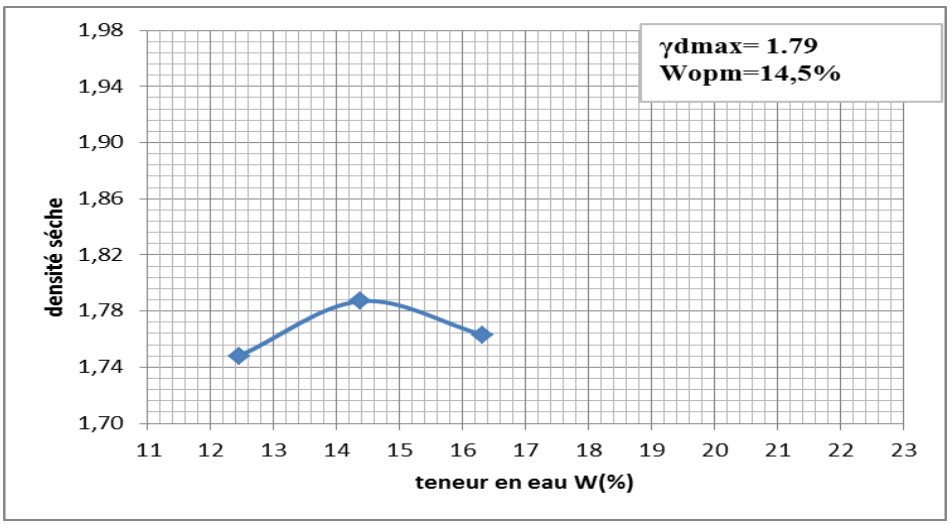


Figure IV.3: Courbe de Proctor modifié (Argile + 0% copeaux de bois)

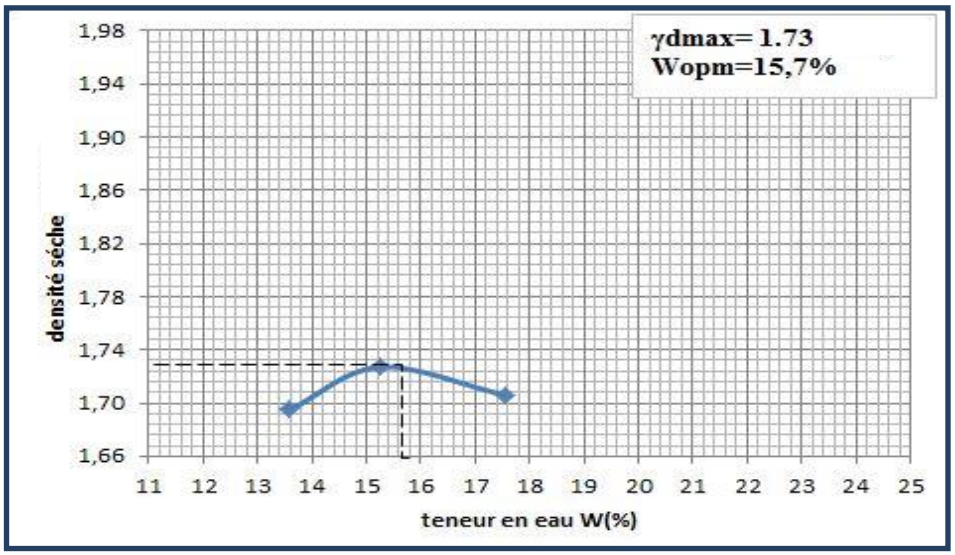


Figure IV.4: Courbe de Proctor modifié (Argile + 2% copeaux de bois)

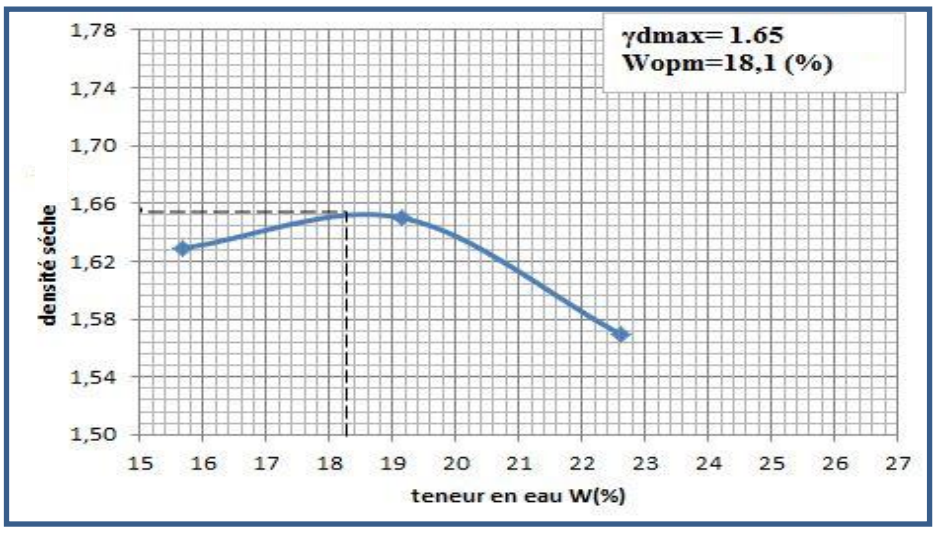


Figure IV.5: Courbe de Proctor modifié (Argile + 4% copeaux de bois)

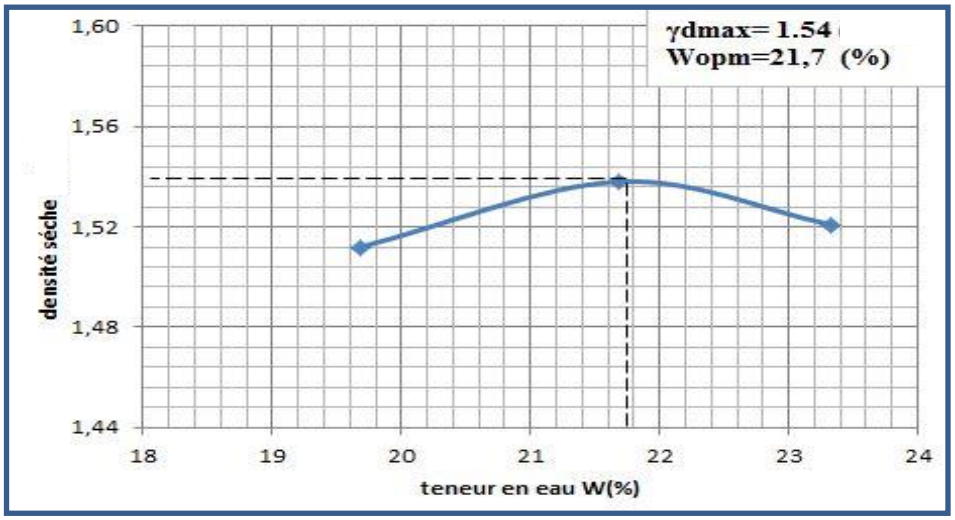


Figure IV.6: Courbe de Proctor modifié (Argile + 6% copeaux de bois)

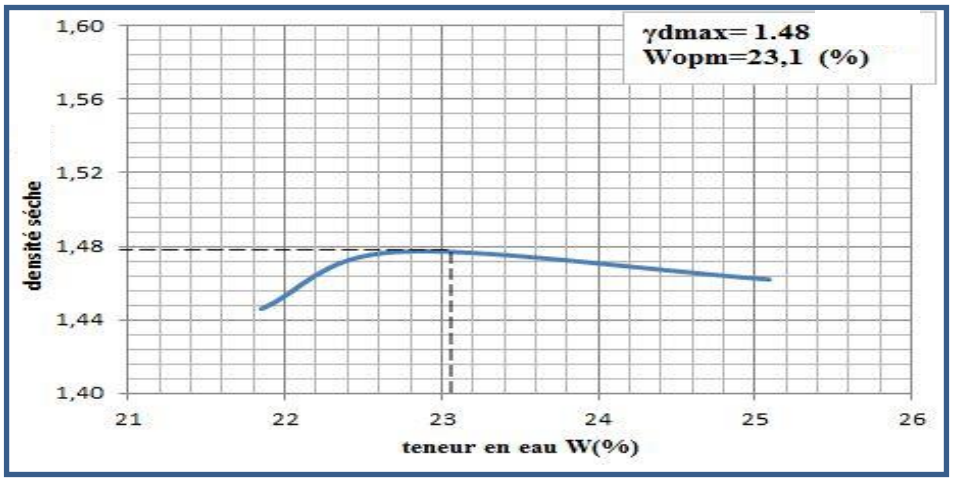


Figure IV.7: Courbe de Proctor modifié (Argile + 8% copeaux de bois)

La Figure IV.8 représente la variation de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage des copeaux de bois ajouté.

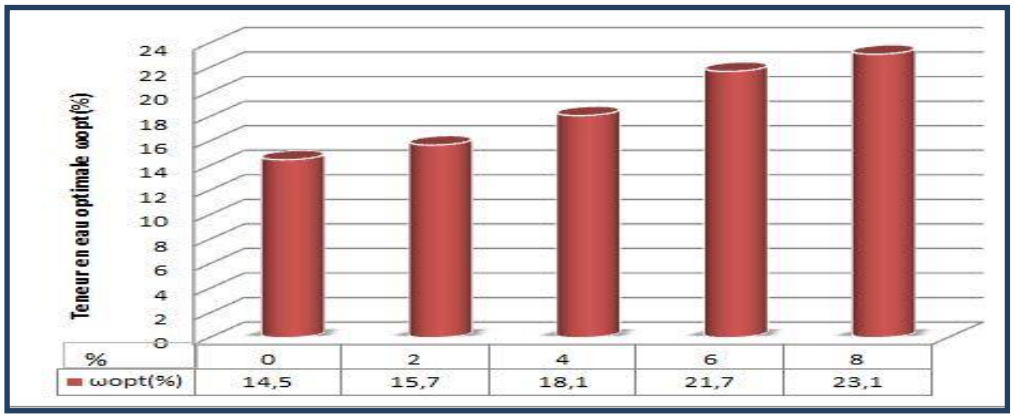


Figure IV.8: Variation de la teneur en eau optimale en fonction du pourcentage des copeaux de bois ajouté

La Figure IV.9 **représente** la variation de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage des copeaux de bois ajouté.

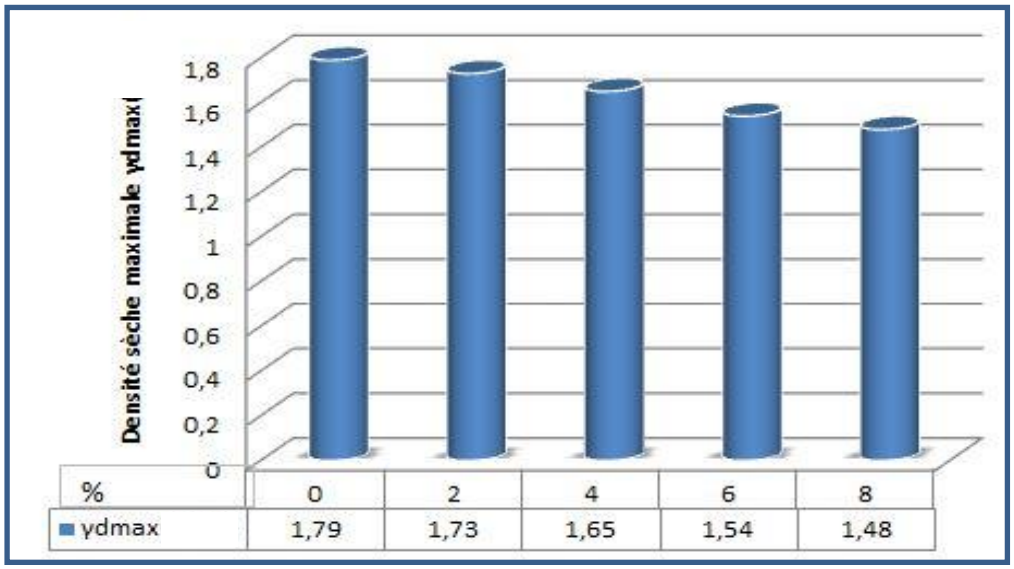


Figure IV.9: Variation de la densité sèche maximale en fonction du pourcentage des copeaux de bois ajouté

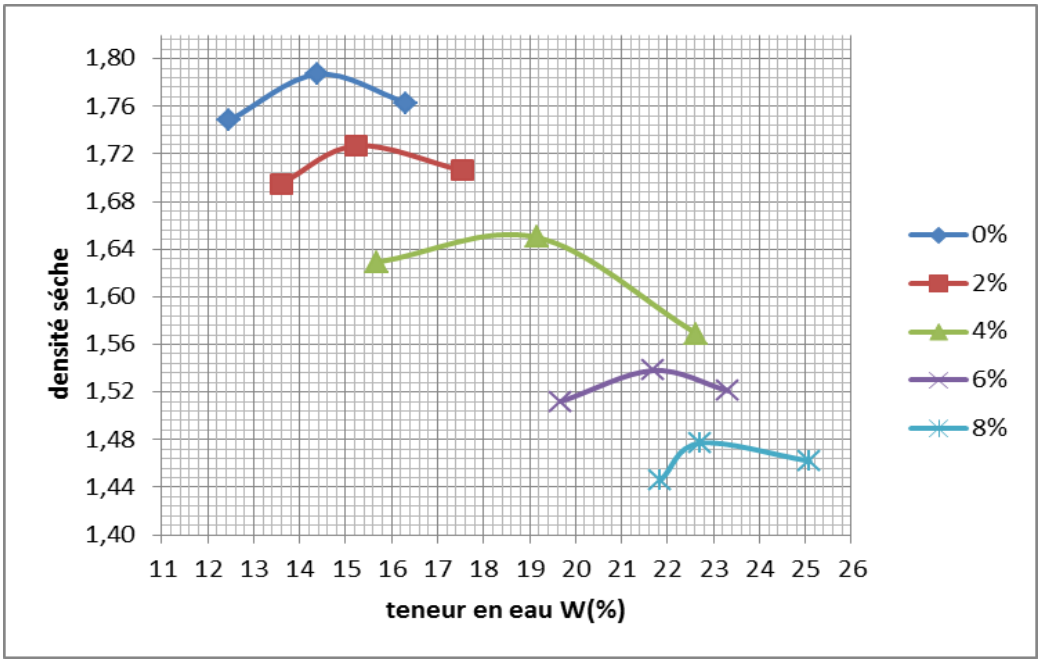


Figure IV.10 : Comparaison entre les courbes de compactage de Proctor modifié des mélanges étudiés

A travers ces figures, nous avons constaté que les valeurs des teneurs en eau optimales augmentent et valeurs des densités sèches maximales diminuent progressivement avec l'augmentation de la teneur en copeaux de bois ajouté.

La réduction pourrait être attribuée à la faible densité des copeaux de bois, cela du a l'interaction physique des particules du sol qui pourrait conduire à différents arrangements microstructuraux.

L'augmentation de la teneur en eau optimal en fonction de l'augmentation de la teneur en matériau ajouté ce la expliquer en raison de la nature des absorbante des copeaux de bois utilisé.

IV.3.3. Effet de l'ajout des copeaux de bois sur les paramètres de résistance au cisaillement

Les résultats de l'influence des différents pourcentages des copeaux de bois ajouté sur la cohésion et l'angle de frottement sont présentés dans le Tableau IV.3.

Tableau IV.3: Résultats la cohésion et l'angle de frottement des mélanges étudiés.

Teneur en copeaux de bois (%)	0	2	4	6	8
C(kpa)	15,62	22,907	31,72	50,75	56,99
Φ (°)	47,7	47,45	43,7	31,53	31,26

Les variations de la contraint de cisaillement en fonction de la teneur en copeaux de bois sont représentées dans les figures suivantes :

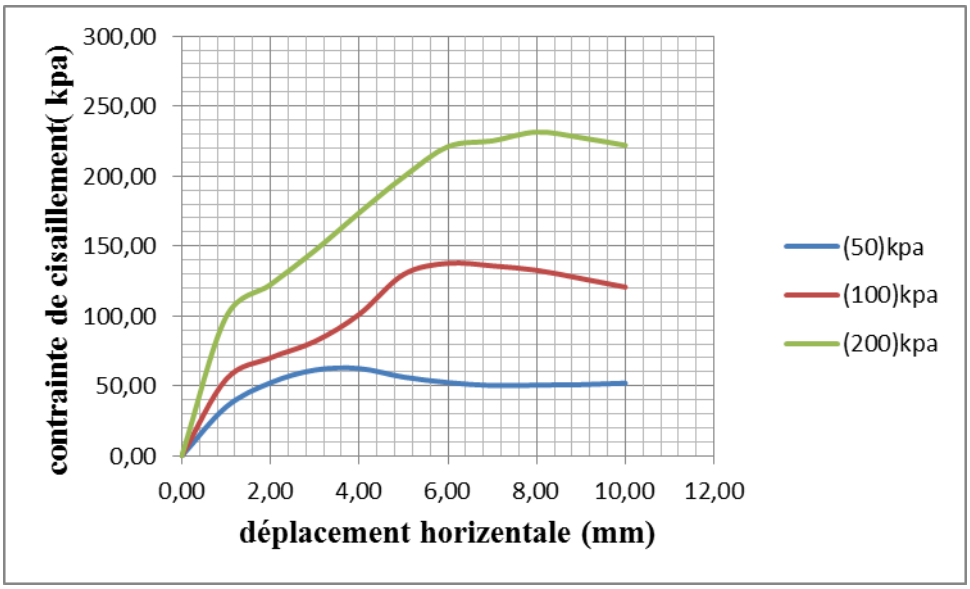


Figure IV.11: Courbe contrainte de cisaillement-déformation (Argile + 0 % Copeaux de bois)

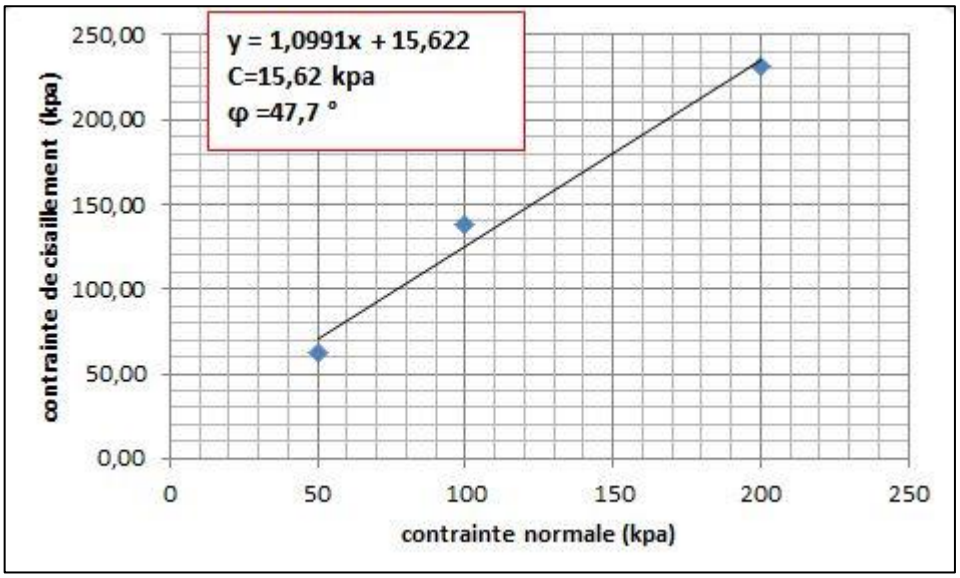


Figure IV.12: Courbe intrinsèque de l'essai de cisaillement (Argile + 0% Copeaux de bois)

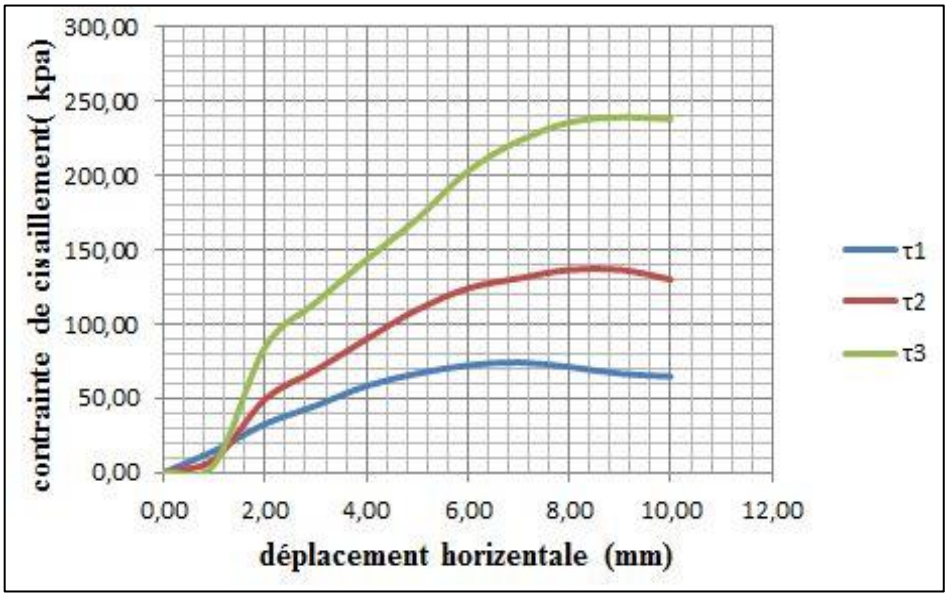


Figure IV.13: Courbe contrainte de cisaillement-déformation (Argile + 2 % Copeaux de bois)

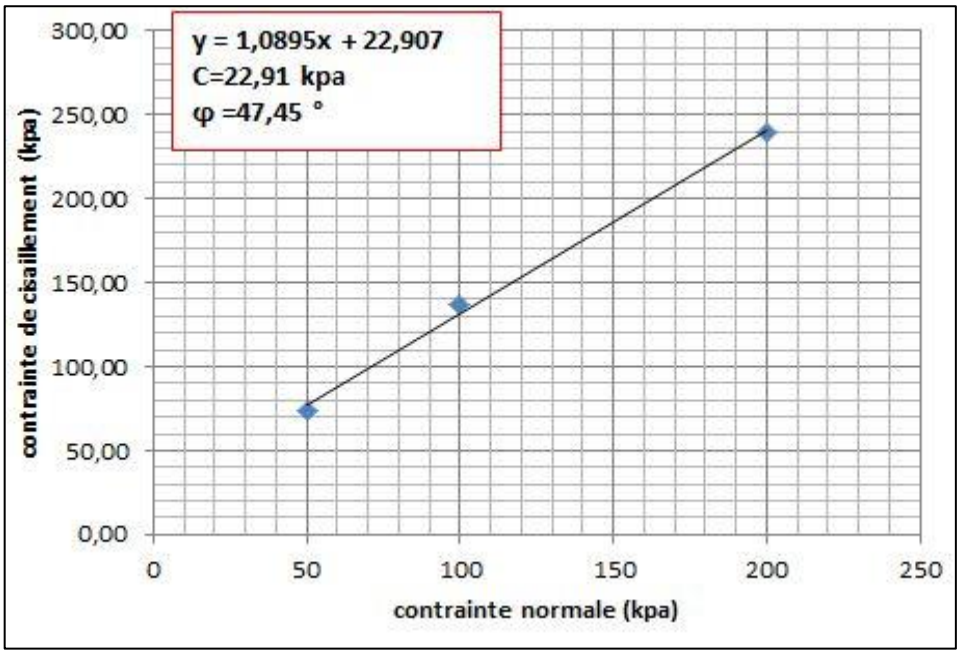


Figure IV.14: Courbe intrinsèque de l'essai de cisaillement (Argile + 2% Copeaux de bois)

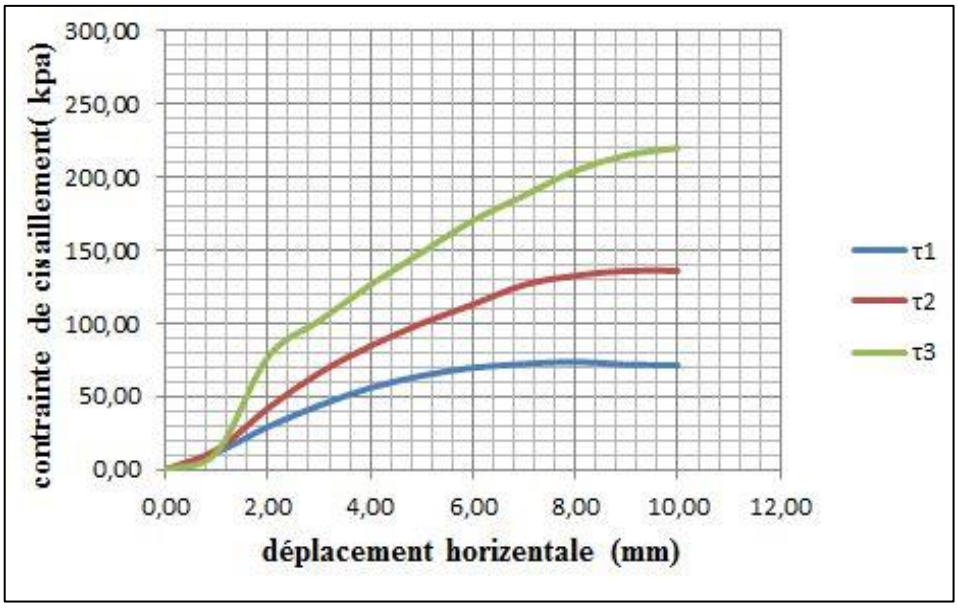


Figure IV.15: Courbe contrainte de cisaillement-déformation (Argile + 4 % Copeaux de bois)

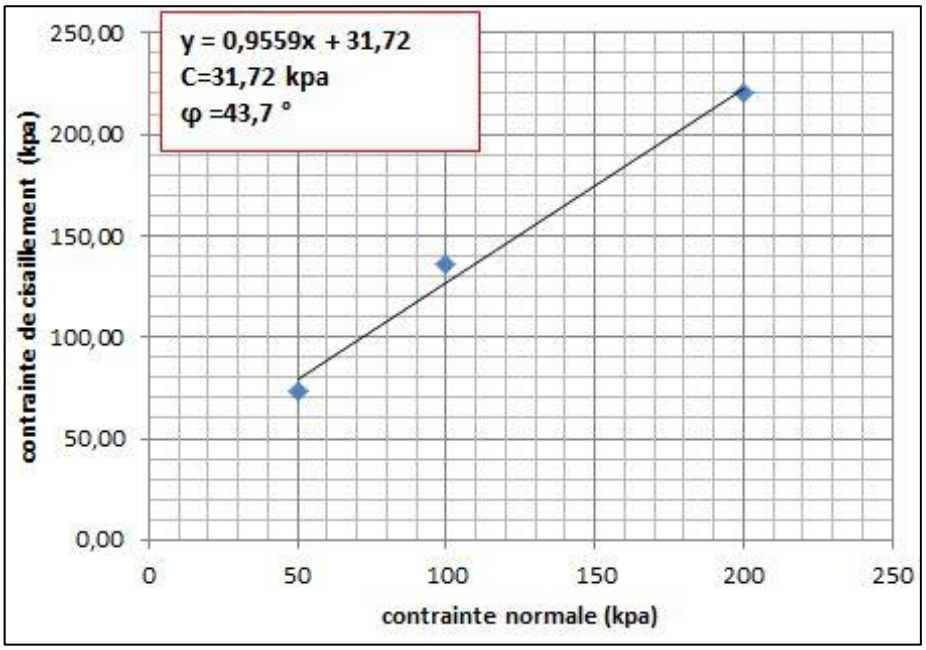


Figure IV.16: Courbe intrinsèque de l'essai de cisaillement (Argile + 4% Copeaux de bois)

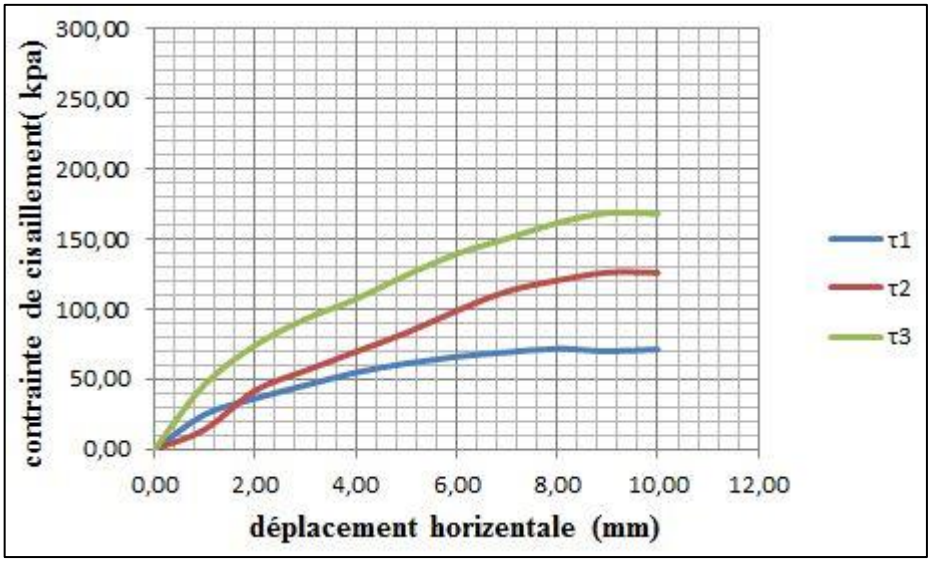


Figure IV.17: Courbe contrainte de cisaillement-déformation (Argile + 6 % Copeaux de bois)

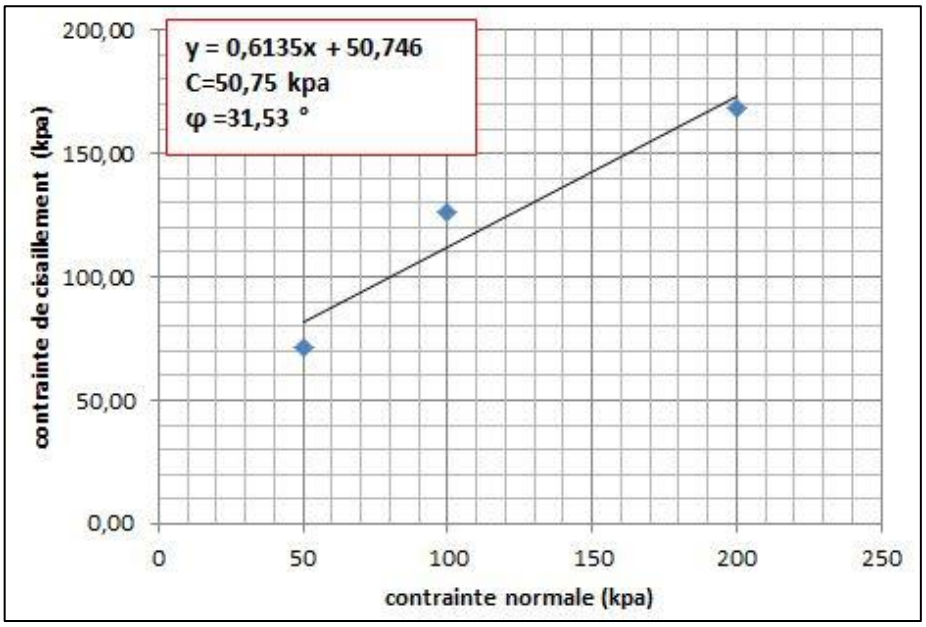


Figure IV.18: Courbe intrinsèque de l'essai de cisaillement (Argile + 6% Copeaux de bois)

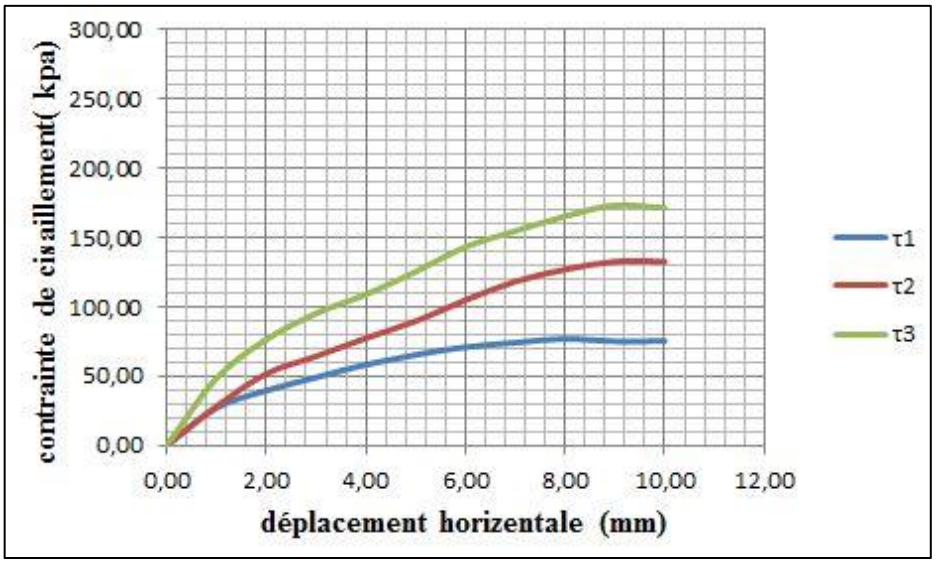


Figure IV.19: Courbe contrainte de cisaillement-déformation (Argile + 8 % Copeaux de bois)

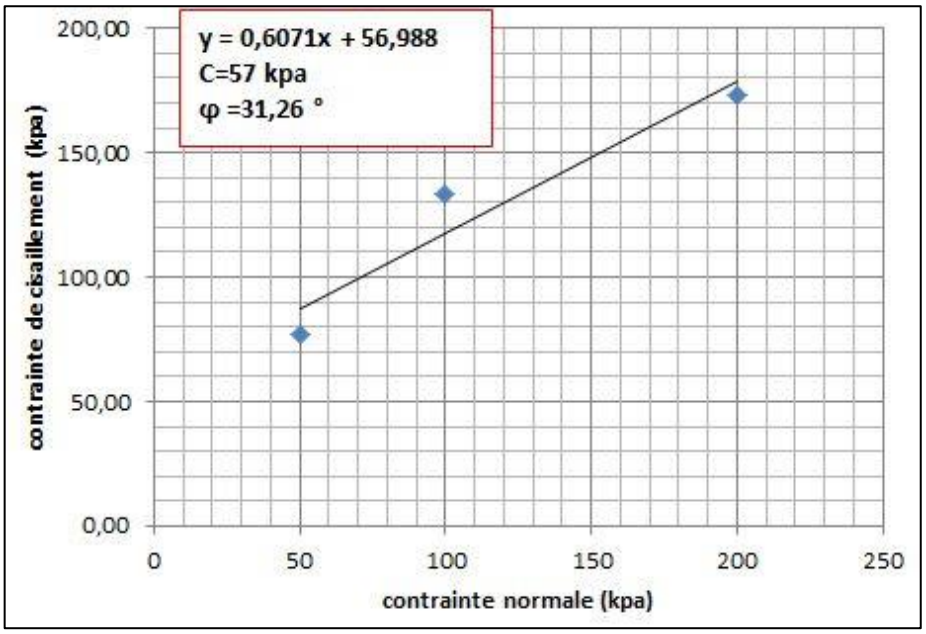


Figure IV.20: Courbe intrinsèque de l'essai de cisaillement (Argile + 8% Copeaux de bois)

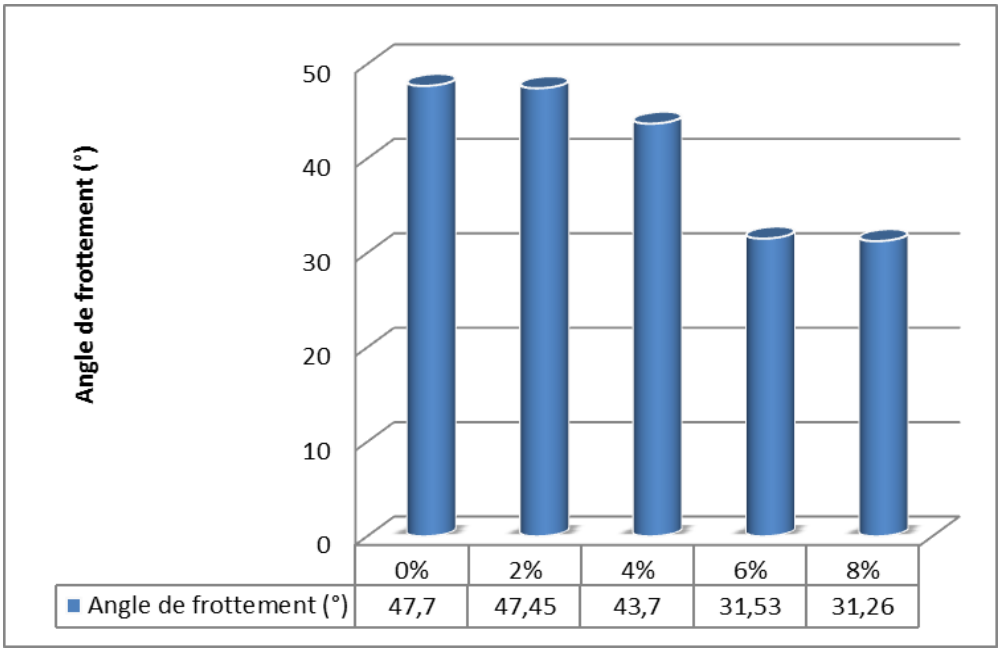


Figure IV.21 : Effet de l'ajout des copeaux de bois sur l'angle de frottement interne de l'argile

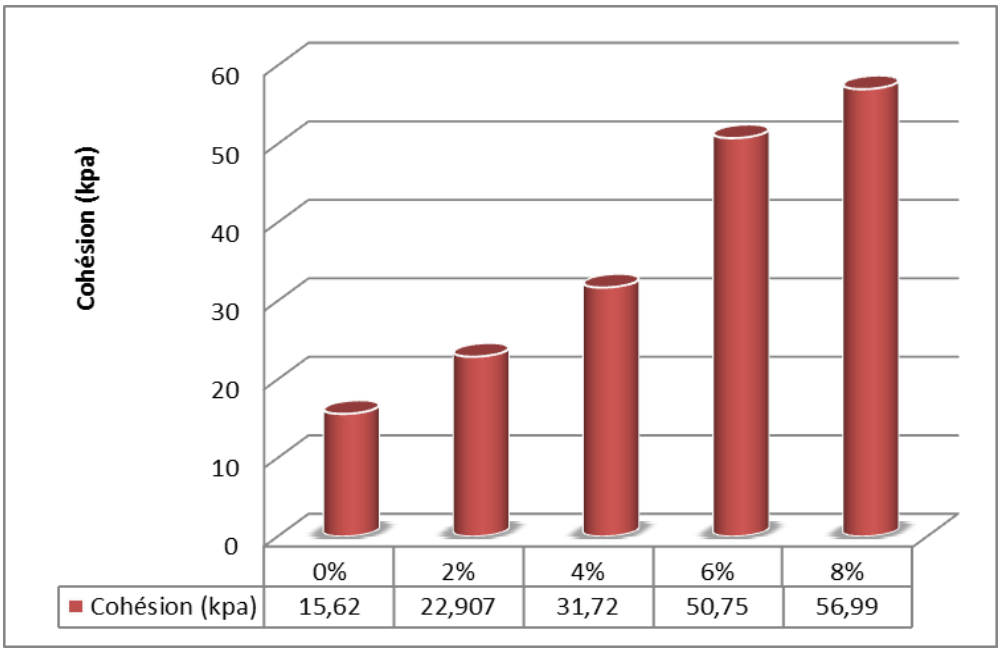


Figure IV.22 : Effet de l'ajout des copeaux de bois sur la cohésion de l'argile

D'après les résultats des Figures IV.21 et IV.22, nous avons constatons que la valeur de la cohésion passe de 15.62 Kpa à 56.99 Kpa et l'angle de frottement diminue de 47.7° à 31.26° avec l'ajout des copeaux de bois. Une diminution de l'angle du frottement et une augmentation de la cohésion du sol en fonction de l'augmentation des copeaux de bois ajouté. On peut conclure que les caractéristiques de cisaillement après l'ajout de différentes proportions des copeaux de bois sont dégrader.

IV.4. Conclusions

Le présent travail a été réalisé dans le but d'améliorer les caractéristiques géotechniques d'une argile à l'aide de déchets de menuiserie (copeaux de bois) à différentes proportions de 0% 2%, 4%, 6% et 8%, a travers les essai de limites d'Atterberg, compactage Proctor modifié et le cisaillement direct.

Les conclusions qui peuvent être tirées des résultats de l'amélioration peuvent être résumées comme suit :

- L'ajout des copeaux de bois au sol argileux a entraîné une modification des valeurs des limites d'Atterberg. Nous avons remarqué que l'ajout de déchets de menuiserie conduit à l'augmentation de la limite de plasticité pour un ajout de 0% à 4% au-delà de ce pourcentage on remarque leur diminution et après à 8% ;
    - Diminution la limite de liquidité pour un ajout de 0% à 6% au-delà de ce pourcentage on remarque leur augmentation ;
    - L'indice de plasticité diminue, Il apparait donc une amélioration de la plasticité du sol traité qui devient moins plastique.
- Les résultats des tests de compactage des sols traités par rapport au sol de référence montrent une augmentation de la teneur en eau optimale du sol de 14.5% à 23.1% parallèlement à la diminution de la densité sèche maximale de 1, 79 à 1, 48.
- De manière générale, on note que l'augmentation de la concentration des copeaux de bois conduit à un angle de frottement (φ) diminué et à une augmentation de la cohésion (C). D'après les résultats, on peut conclure que les caractéristiques de cisaillement après l'ajout de différentes proportions des copeaux de bois sont dégrader.

Conclusion générale

Conclusion générale

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour avoir des solutions qui minimisent les problèmes liés aux sols argileux. Le choix des techniques de stabilisation 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'étude présentée a pour objectif d'étudier un sol fin dans un site situé au KOUALA à la wilaya de MEDEA, et d'améliorer ses caractéristiques géotechniques par un traitement à déchets de menuiserie (copeaux de bois. Pour ce faire, un travail expérimental a été effectué. Les résultats expérimentaux sont résumés ci-dessous :

- Les analyses granulométriques réalisées donnent un pourcentage des passants à 80 μm égale à 95 % .Ces valeurs indiquent que le sol présente une granulométrie très fine ;
- La valeur au bleu VBS est égale à 5.84g/100g de sol, on peut le classer dans la catégorie des sols limoneux-argileux ;
- Les résultats de l'indice de plasticité (Ip = 40.15 %) indiquent que le sol étudié est une argile très plastique ;
- La valeur de la densité sèche γ_{dmax}= 1.79 , et la teneur en eau optimale correspondante égale a 14.5 % ;
- Le résultat de l'essai de cisaillement montrent que, l'angle de frottement φ = 47.7° et la cohésion C= 15.62 KPa ;

Le traitement de cette argile a été effectué en utilisant les dosages suivant : 0%, 2% ; 4%, 6% et 8%

- l'ajout des copeaux de bois au sol augmente sa limite de plasticité et diminue son indice de plasticité ;
- l'ajout des copeaux de bois augmente la teneur en eau optimale du sol et diminue son poids volumique sec maximal (densité sèche) ;
- l'ajout des copeaux de bois augmente la cohésion (C) du sol et Diminue l'angle de frottement (φ)..

Les résultats obtenus ont montré que l'ajout de copeaux de bois à un sol fin affectait négativement ses propriétés mécaniques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Akbulut, S., Arasan, S., Kalkan, E., (2007) Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers, Applied Clay Science 38. pp. 23–32.

Allègre, J. (2012), Les silicates d'alumine (ARGILES) en thérapeutique (Doctoral dissertation, université paris), p 16.

Ammeri, A., Bouassida, M., Jamei, M., Villard, P., &Gourc, J. P. (2008). Détermination expérimentale de la résistance à la traction par fendage des sols fins. innovativegeotechnical engineering ingenieriegeotechnique innovante, 331.

Armines, C, (2006). « Aléa et risque sécheresse et sécheresse géotechnique et bâti», Projet de recherche réalisé par Mines ParisTech -Centre de Géosciences, France.

Atlan, Y., &Feller, C. (1980). Application de la Pedologie a la characterisationgéothechnique de quelques sols fins du Senegal. Bull IAGE, (22), 233-240.

Bekhouche, H. (2019). Traitement par le ciment des sols gonflants non saturés (Cas de la région des Aurès) (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).

Belabbaci, (2014). Stabilisation Des Sols Gonflants, Thèse De Doctorat Lmd Formation Doctorale, Sols Et Structures.

Bensaada ó. A, B. Choungache, and R. Zaitri. (2023). "Influence of the Incorporation of Alluvial Sand on the Mechanical Behavior of Marl Soil", *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 13, no. 2, pp. 10363–10366.

Bengaraa, H. (2004), Contribution a l'étude de la stabilisation du gonflement par ajout du sable, thèse de magister.

Bouziane .R &Nessaib .S (2022). Renforcement des argiles de doukane (tébessa)
Université Larbi Tébessi Tébessa.

Boutouchesilyouna (2017) stabilisation d'un sol argileux par traitement à la chaux et au ciment cas du site : lotissement Mokadam, université mouloud mammeri de tizi-ouzou.

Boukhatem Ghania , Rehab Bekkouche Souhila , Mendjel Djenette3 (2021). The İnfluence of Varying Percentage of Sand on The Properties of Coherent Soil, International Congress on the phenomenological Aspects of civil Engineering. Corresponding Author ORCID: 0000-0002-1107-484.

Bouhlassachaith 2022. Sols fins et stabilité des ouvrages en terre : érosion,

dispersion, typologie et pathologie -Université ECHAHID CHEIKH LARBI TEBESSI - Tébessa –

Bekhiti M, H. Trouzine , F. Belabdelouahab (2012).Influence Des Fibres De Caoutchouc Sur Le Potentiel De Gonflement Des Argiles. Journée d'Étude Scientifique et Technique sur les Produits Géosynthétiques

Caillère S. and Henin S. Rautureau M. (1982). Minéralogie des argiles.1. Classification et nomenclature, INRA, Actualités scientifiques et agronomiques,9, Ed, Masson, Paris, 2ime édition, 189p.

Charles .N, Colin .S, Gutierrez. T, Lefebvre .G, (2018), Mémento kaolin et argiles kaoliniques. Rapport final. Rapport BRGM/RP-67334-FR, p 13 -14

Dubois, J. (2019). Caractérisation géotechnique des sols fins. Revue Géotechnique, 178(3), 45-53.1. mémoire de NARDJAS.D et FADILA.N .stabilisation des sols fins 13.06.2016)

Delage, Pierre. 2014. Problèmes géotechniques liés à l'effondrement des sols non saturés : le cas des loess. 2014. Vol. 1, pp. 17-22.

Ferber, V. (2005). Sensibilité des sols fins compactés à l'humidification: apport d'un modèle de microstructure (Doctoral dissertation, Nantes).

FERHAT Imed eddine 2019 -Effet du type de fibres sur les propriétés de l'adobe -Université Mohamed khider –Biskra.

Guermiti, L., Bensaada, A., Rabehi , M., Bentebba, M. T., & Bouziani, T. (2024). Characterisation of lightweight concrete blocks made from dune sand and wood chips. Studies in Engineering and Exact Sciences, 5(1), 1279–1295.

Grim R.E. (1962). Clay mineralogy in relation to the Engineering properties of clay materials. Mc Craw Hill, pp.204-277.

Hafsi. A (1993). « Théories de la double couche et gonflement des argiles non. Saturées» Euromech colloquium N°209: Mechanics of swelling, Rhodos, Greece, August 23- 27 .1993.

Holtz R.D, Covacs W.D. (1991). Introduction à la géotechnique. Edition de l'école plytechnique de Montreal, 808 pages.

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of soil behavior (Vol. 3, p. USA). New York: John Wiley& Sons.

Maëva BOURGEOIS, elise coquillart, morgane cournarie, claire fassino. 1992.

Nardjes DRAOU &Fadela NEBATI, 2016 : Stabilisation des sols fins.

NF P94-071-2. Sols : reconnaissance et essais - Essai de cisaillement rectiligne à la boîte.

NF P94-093né. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié.

NF P94-051. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.

NF P94-056. Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.

NF P94-068. Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache.

Wakim, J. (2005). Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses. France, Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de Paris.

Ferrah .f, (2006). Prise en compte du gonflement pour le dimensionnement des fondations superficielle, Thèse de magistère, Université de Batna ; pp : 37-42.

Prabir K. Kolay, K. C. Ramesh (2016). Reduction of Expansive Index, Swelling and Compression Behavior of Kaolinite and Bentonite Clay with Sand and Class C Fly Ash ,Geotechnical and Geological Engineering. DOI: 10.1007/s10706-015-9930-4.

Roy, Jérémie. (2015). Les types de sols. slideplayer. http://slideplayer.fr/slide/3850054/.

Xiang-liang LI., 1999.comportement hydromécanique des sols fins : de l'état saturé à l'etat non saturé. Thése de doctorat en science appliquées, Université de liége.

Zouhair Attima1 , Abdelilah Dekayir1 , Mohamed Amine Doss BENNANI2 , Kamal

Elhammouti A (2014). Stabilisation Des Sols Argileux Par La Chaux, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014.